

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
Научный совет по проблеме "Физика и техника
миллиметровых и субмиллиметровых волн"
Институт радиофизики и электроники

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Сборник научных трудов

Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами:Со.науч. тр. / АН УССР.Ин-т радиофизики и электрон.;Редкол.:Шестопалов В.П. (отв.ред.) и др.-Киев: Наук.думка,1989.-152 с.- ISBN 5-12-000864-X.

В сборнике приведени результати исследований взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами. Рассмотрены как фундаментальные задачи, связанные с изучением общих физических закономерностей, так и вопросы использования электромагнитного излучения в медицине и сельском хозяйстве.

Для научных работников и инженеров, работающих в области ра-

диофизики, электроники, биофизики, биологии, медицины.

Редакционная коллегия

В.П.Шестопалов (ответственный редактор). Н.В.Андренко. А.А.Вертий, Л.М.Егорова, А.М.Калмыков, Ф.В.Кивва, А.А.Кириленко, А.П.Королюк, А.А.Костенко (ответственный секретарь). Е.М.Кулешов, В.Я.Малеев. В.Б.Разоказовокий, Б.К.Скрынник, А.Я.Усиков, Г.М.Хлопов, В.М.Яковенко

Утверждено к печати ученым советом Института радиофизики и электроники АН УССР Редакция физико-математической литературы Редактор В.М.Чирков Научное издание

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЈН МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУЕМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Сборник научных трудов

Художник обложки М.Э.Кропивницкая

Кудожественный редактор И.Е.Писарева
Технический редактор С.С.Хаща
Оператор А.С.Серикова
Корректорн Л.Н.Вальнева, О.В.Собкевич

MB № 9970

Сдано в набор 20.05.89. Подп. в печ. 24.10.89. БФ 02604. Формат 60ж84/16. Бум. офс. № 1. Офс. печ. Усл. печ. л. 8.96. Усл. кр.-отт. 9,19. Уч.-иад. л. 9,59 + вкл. 0,11 = 9,70. Тираж 700 экз. Заказ 9-285. Цена 1 р. 90 к.

Оригинал-макет подготовлен в издательстве "Наукова думка". 252601 Киев 4, ул. Репина, 3. Киевская книжная типография научной книги. 252004 Киев 4, ул. Репина, 4.

(c)

И 2302020100-586 416-89 M221(04)-89

ISBN 5-12-000864-X

Издательство "Наукова думка", 1989

УДК 624.3.029.65:577.3.2

В.Я. Малеев, В.А. Каштур

О МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С БЕЛКАМИ И ДНК. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящее время накоплен общирный эксперимейтельный материал о воздействии электромагнитного излучения миллиметровых волн на бислогические объекты разного уровня организации — от макромолекул до целостного организма /4-37. Некоторие обнаружение эффекты уже применяются в медицинской практике. Наиболее интригующим моментом в этих экспериментах является обнаружение чрезвычайно острых резонансных эффектов воздействия электромагнитного излучения на бислогические объекты. Выяснение молекулярной природы указанных резонансных эффектов — весьма важная задача.

В данной статье приведен краткий обзор современного состояния проблемы применительно к важнейшим типам биологических макромолекул — белкам и ДНК. Обсуждены литературные и оритинальные данные, относящиеся к теоретическому и экспериментальному изучению колебательных состояний этих биополимеров в интервале частот, включакщем сантиметровые (см), миллиметровые (мм) и субмиллиметровые (субми) волны.

Теоретические модели колебаний белков. В случае глобулярных белков рассматриваются механизмы, которые предполагают коллективные движения всей макромолекулы или отдельных ее крупных частей субъединиц, доменов и т.п. При расчете нормальных колебаний на основе данных рентгеноструктурного анализа на уровне атомного разрешения выбирают исходные косрдинаты в конформационном пространстве макромолекул и используют различные приближения для выделения из полной матрицы силовых констант части, ответственной за наиболее низкочастотные моды с учетом возможных нелинейных эффек-

тов. Из теоретических работ такого плана отметим несколько исследований, выполненных в последние годы.

В работе Гё и др. $\boxed{4}$ рассчитаны низкочастотные моды колебаний для небольшого глобулярного белка — ингибитора бычьего панкреатического трипсина. Частоты колебаний ниже 120 см $^{-1}$ отвечают модели упругих колебаний белковой молекулы, моды с частотами ниже 50 см $^{-1}$ (a > 0,2 мм) соответствуют ангармоническим колебательным пвижениям.

Чоу развита квазинепрерывная модель /5/, которая предполагает, что доминантный низкочастотный мод в молекуле белка определяется коллективными флуктуациями слабых связей, в частности водородных, и внутренним смешением массивных атомов. На основе этой модели рассчитаны низкочастотные движения в гила "гармошки" в гило прижательные движения гипа "гармошки" в гило прижательные движения гипа "гармошки" в гило прижательные движения гипа "структура) на примере иммуноглобулина С и конканавалина А отвечают низкочастотным модам при 20-30 см⁻¹ (гило пр. 5-0,3 мм).

В работе Леви и др. [6] применен квазитармонический метод расчета нормальных колебаний, в котором эффективные силовые постоянные получают вичислением в рамках молекулярной динамики средних квадратичных изменений внутренних виртуальных координат с учетом ангармонических эффектов. Рассмотрен уже упомянутий белок ингибитор панкреатического трипсина, в котором в качестве центров взаимодействия взяты аминокислотные остатки. Наивысшая частота из 168 рассчитанных нормальных колебаний соответствует 250 см⁻¹, наинизшая — 0,32 см⁻¹ (A = 3 см), тем самым предсказано много колебаний, попадающих в интересующий диапазон.

В статье Брукса и Карплуса 77 использован итерационный метод, позволяющий извлечь собственные векторы из полной матрицы вторых производных потенциальной энергии системы. С помощью указанного метода рассмотрено междоменное движение в лизоциме (шарнирно-изгибный мод) с частотой 3,6 см $^{-1}$ ($\mathcal{A}=2,8$ мм).

Теоретические модели колебаний ДНК. В случае ДНК теория также предсказывает возможность существования колебаний, проявляющихся в диапазоне КВЧ. Свыше 20 лет назад нами была рассмотрена, модель связанных крутильных колебаний азотистых оснований в ДНК /87. По оценке частотного диапазона, в котором могут проявиться эти колебания, получены значения порядка 10-100 см⁻¹, т.е. л = = 1-0,1 мм.

В последнее время низкочастотные колебательные состояния ДНК изучены в серии работ Проковского и соавторов 29-127. Они развивают "твердотельные" представления применительно к двойной спирали

ДНК, в которой, по предположению, имеются дальние коллективные взаимодействия. Рассмотрены решеточные моды в фононном спектре ДНК с использованием модели валентного и дальнего электростатического силового поля. На основе этих моделей рассчитаны частоты (20,3; 25 и 27 см⁻¹) модов, активных в спектре комбинационного рассеяния 297.

Другая модель предполагает наличие акустических волн в двойной спирали - продольных и поперечных. Частоты этих колебаний определяются упругими свойствами ДНК и зависят от длины цепи ДНК, изменяя которую, можно перекрыть широкий диапазон, охватывающий субмм, мм и см волны.

Предсказаны также локальные колебания типа "резонанса на дефектах" структуры ДНК (концевые дефекты и дефекты типа "вилки") Д17. Эти колебания предположительно обнаружены экспериментально на низких частотах ~ 600 МГц /337.

Отметим также модель конформационной подвижности ДНК, предложенную С.Н.Волковым и А.М.Косевичем 2747, в которой рассматриваются "маятниковые" движения нуклеозидов. Частоты колебаний, определенные в этой модели (10 и 60 см⁻¹), отвечают субми волнам.

Из перечисленных результатов видно, что как в белках, так и в ДНК теория предсказывает существование низкочастотных колебаний, проявляющихся в интересующем нас диапазоне.

Экспериментальная ситуация. Спектры "сухих" биополимеров. Трудности экспериментального наблюдения предсказываемых теоретически колебательных состояний белков и ДНК в КВЧ-диапазоне связаны: 1) с отсутствием достаточно чувствительной спектральной аппаратуры в диапазоне между ИК- и СВЧ-областями; 2) с наличием очень сильного поглощения воды в этом диапазоне. Теоретические модели, о которых шла речь выше, не учитывают, как правило, взаимодействия с волным растворителем. Учет этого взаимодействия на простейших моделях упругих колебаний биополимеров в вязкой среде приводит к сдвигу резонансных частот и "расплыванию" спектров в широкие полосы /10, 457. В этой связи следует отметить недавною работу Ван Зандта /167, в которой предлагается возможная теоретическая интерпретация резонансного поглощения микроволнового излучения растворами плазмидной ДНК, обнаруженного Эдвардсом и др. 777. В основу модели положено предположение о том, что гидратная оболочка ДНК представляет собой слоистую структуру и взаимодействие первого слоя воды с ДНК происходит без диссипации энергии.

В большинстве экспериментов по обнаружению колебательных состояний используются образцы либо вообще не содержащие воды, либо слегка увлажиенные. Наиболее определенная картина наблюдается в спектрах комбинационного рассеяния сухих образцов белков и увлажненных образцов ДНК ДТ8-247. В случае глобулярных белков обнаруживаются низкочастотные моды вблизи 20-30 см⁻¹, частота которых слабо зависит от размеров и формы белковых глобул ДТ87.

Интересны результать, полученные для ДНК на образцах, содержащих разное количество воды. По данным Урабе и др. 20, 217, в спектре комбинационного рассеяния для А-формы ДНК наблюдаются полосы при 85 и 24 см⁻¹. С увеличением содержания воды в образце низкочастотной мод сдвигается в сторону низких частот к 14 см⁻¹ для В-формы ("смягчается") и исчезает при дальнейшем добавлении воды. Эта особенность позволила отнести указанный мод к межспиральному колебательному движению.

В мм диапазоне имеется мало данных о возможных колебательных состояниях белков и ДНК. Можно лишь отметить работи Гензела, Кремера и др. 122, 237, в которых измерена диалектрическая проницаемость сухих образцов белков на примере гемоглобина, лизоцима и полишентида — полиаланина в широком интервале частот 10-1000 ІТц с помощью техники сверхразмерного резонатора и при разных температурах (от комнатной до гелиевой). Никаких полос поглошения в моследованных образцах автори не обнаружили. Коэффициент поглошения монотонно возрастает с частотой по закону 3/2, а дисперсия $\mathcal{E}(\omega)$ может быть объяснена наличием трех дебаевских релаксационных процессов, заключающихся в релаксации атома водорода в двухъмном потенциальном ящике, моделарующем водородную связь №...ос.

В связи с обсуждаемой проблемой следует выделить уникальные результать, полученные Н.П. Диденко с соавторами [247]. Использун метод ядерной гамма-резонансной спектроскопии для регистрации изменений конформации белка — лисфильно высущенного гемоглобина, меченого 57 гд, под воздействием электромагнитного излучения в дивназоне 40-50 ГПЦ, авторы обнаружили чрезвычайно узкие пики воздействия ($\Delta f/f \sim 10^{-4}$). Учитывая принципиальное значение этих данных, на наш взгляд, следует провести тщательный и всесторонний анализ условий проведения указанных экспериментов.

Экспериментальные исследования растворов биополимеров. Поскольку большинство моделей, предсказнвающих наличие колебательных состояний в биополимерах, учитивает их динамические свойства
и конформационную подвижность, т.е. неявно предполагает взаимодействие с растворителем, важны экспериментальные исследования
дивлектрических свойств биополимеров при наличии большого количества воды, что реализуется в растворах.

По нашим многочисленным данным о диалектрических характерис-

тиках растворов многих белков и нукленновых кислот, в диапазоне 6-8 мм не обнаруживается избиточное поглощение, которое можно было бы приписать растворенным макромолекулам. Напротив, наблюдается декремент диалектрической проницаемости, объясняемый гидратацией этих биополимеров и позволнящий тем самым изучать этот эффект изменения состояния воды в растворах 25-27.

В связи с этим безусловный интерес вызывают результать, полученные Свайкордом и др., о наличии большого избиточного поглошения электромагнитного издучения см пиапазона водними растворами ЛНК /28. 297. Согласно этим данным, в диапазоне 8-12 ITu молеку-JIM IIIK MB F. coli nordoment shektoomarhuthoe usavyehme shequiteabно сильнее, чем вода (в 25 раз больше на частоте 8 ГГц /287). Ис--SM MINDSPROTEMONTANCEUM MINDFOT SECON CHOOTEN TABOOS TOTE RVISIO тодом /297. авторы не нашли заметного поглощения ДНК. Однако в процессе инкубации раствора ЛНК с ферментом ЛНКазой наблюцали интенсивное пополнительное поглошение во всем пканавоне 9-12 ІТп (в 400 раз больше, чем у эквивалентного количества воли!). Наблидаемые эффекти были объяснены с помощью модели акустических воли во фрагментах ЛНК соответствующей длины /107. Этой же группой исследователей было также обнаружено резонансное поглощение большой интенсивности в диапазоне частот 2-10 ПТи водних растворов плазмилной ДНК, молекулы которой имеют строго определенную длину /17.

Мы предприняли специальное изучение микроволнового поглошения ДНК в условиях, подобных тем, которые описаны авторами указанных работ. Метолом переменной толимны, обеспечивающим точность измерения не жуже 1 %. в пиапазоне частот 9-12 ГГп изучено поглоще-HWE BOURNX DACTBOODS THE US SPUTPOINTOB UNITED IN IS E coli . HATUBных и фрагментированных ультразвуком и ДНКазой /307. Фрагменты ДНК онли проанализировани с помощью гель-электрофореза на 4 %-ном горизонтальном агарозном геле. Показано, что при расшеплении ЛНК из E. coli ЛНКазой в течение 50 с свыше 50 % ДНК присутствует в виде фрагментов с плинами от 800 по 2800 пар нуклеотилов (пн). а 25 % материала — с илинами от 2800 до 5400 пн. При ультразвуковой обработке основная часть фрагментов имеет среднию длину около 500 пн. котя примерно 20 % ДНК представлено в виде фрагментов с длинами от 800 до 2600 ин. Следовательно, в изученных образиах имеется достаточное количество фрагментов ДНК с длинами несколько тисяч пар нуклеотидов, для которых, согласно [29, 47], можно было бы ожидать увеличенное поглошение электромагнитного излучения.

Однако во всех исследованных случаях такого избиточного поглошения по сравнению с растворителем мы не наблюдали. Возможно, обнаруженные эффекты частично обусловлены тем, что эталонный раство-

ритель, использованный авторами цитированных работ, не содержал всех компонентов, в частности соли MaCl, , необходимой для действия ДНКазы. Наличие этой соли повышает коэффициент поглощения на 7 %. Не учитывая этого эффекта, можно объяснить полученный результат собственным поглощением ДНК, которое будет превышать поглощение воды в 35 раз (концентрация ДНК 0,2 %).

Мы не проводили экспериментов по изучению микроволнового поглошения растворами плазмилной ЛНК в интервале частот 2-10 ГТп. Однако полученные нами результаты об отсутствии избыточного поглошения растворов ДНК на границе этого диапазона свидетельствуют о том, что необходим тщательный анализ экспериментальных условий, в которых авторы работы /177 обнаружили резонансные эффекты.

Заключение. Из краткого обзора известных теоретических и экспериментальных данных видно, что изучение механизмов поглощения электромагнитного излучения миллиметрового и примыкающих к нему пианазонов макромолекулами белков и ЛНК представляет важную и актуальную задачу при решении проблемы конформационной линамики биополимеров и проблеми выяснения механизмов воздействия ЭМИ на биологические объекты.

Вместе с тем следует отметить, что котя теория предсказывает существование различного рода колебаний в белках и ДНК, частоты которых попадают в указанные диапазоны электромагнитных волн, экспериментально такие колебания, как правило, не обнаруживаются. По нашему мнению, для существования острых резонансов в этих биополимерах вообще нет достаточно разумных физических оснований. Относительно "нормальных" резонансных эффектов (с добротностями порядка 10-100) подобная ситуация в принципе возможна, но для надежного обнаружения таких колебаний требуется дальнейшая разработка чувствительных экспериментальных методов, способных виделить нужные эффекты на фоне преобладающего поглощения водой, и развитие теоретических моделей, максимально учитывающих реальные экспериментальные условия.

1. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под. ред. Н. Л. Девяткова. — М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1983. — 220 с.

2. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в био-логии и медицине: Тез. докл. УТ Всесоюз. семинара. — М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР. 1986. — 111 с. 3. Coherent exitations in biological systems / Eds. H. Frohlich,

F. Kremer: - Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1983. - 224 p.

4. Go N., Noguti T., Nishikawa T. Dynamics of the little globular protein in the terms of low-frequency vibration modes // Proc. Nat. Acad. Soc. USA. Biol. Sci. - 1983. - 80. - P. 3696-3700.

5. Chou K.-C. low-frequency motions in the protein molecules // Biophys. J. - 1985. - 48. - P. 289-297.

6. Levy R.M., Srinivasam A.R., Olson W.K. Quasi-harmonic method for studying very low frequency modes in proteins // Riopo-

lymers. - 1984. - 23. - P. 1099-1112.
7. Brooks B., Karplus M. Normal modes for specific motions of macromolecules: Application to the hinge-bonding mode of lysozyme // Proc. Nat. Acad. Soc. USA. - 1985. - 82. -

8. Малеев В.Я. Кругильные колебания оснований в нуклеиновой кис-

лоте // Биофизика. - 1965. - 10. - С. 729-734.

9. Prasad Devi K.V., Prohofsky E.W. Low-frequency lattice mode predictions in A-DWA compared to experimental observations and significance for A-to-B conformational change // Biopo-

lymers. - 1984. - 23. - P. 1795-1798.

10. Van Zandt L.L., Kohli M., Prohofsky E.W. Absorption of microwave radiation by DNA double helix in aquo // Ibid. - 1982.-

21. - P. 1465-1468.

M. Dorfman B.H., Van Zandt L.L. Vibration of DNA polymer in

viscous solvent // Ibid. - 1983. - 22. - P. 2639-2665.

12. Phonons in the DNA double helix / E.W. Pronoisky, L.L. Van
Zandt, M. Kohli et al. // J. Phys. C. - 1981. -42, N 6. -P. 560-562. 43. Lindsay S.M., Powell J. Possible observation of a defect re-

зопапсе in DNA // Biopolymers. - 1983. - 22. - Р. 2045-2060.

14. Волжов С.Н., Косевич А.М. Конформационные Колебания пруктяжевой ЛНК. - Киев, 1986. - 25 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т теорет. физики: № 86-119 Р).

45. Persson B.N.J. On the nature of low-frequency vibration modes in the globular protein molecules inserted into the wa-

ter // Chem. Phys. Lett. - 1986. - 127. - P. 428-431.

16. Van Zandt L.L. Why structured water causes sharp absorption by DNA at microwave frequencies // J. Biomol. Str. and Dynamics. - 1987. - 4. - P. 569-582.

17. Resonant microwave absorption of selected DNA molecules / G.S. Edwards, C.C. Davis, J.D. Saffer et al. // Phys. Rev. Lett.

1984. - 53. - P. 1284-1287.

18. Painter P.C., Mosher L., Rhoads C. Low-frequency modes in the Raman spectra of proteins // Biopolymers. - 1982. - 21.-P. 1469-1472.

19. Painter P.C., Mosher L.E., Rhoads C. Low-frequency modes in the Raman spectrum of DNA // Ibid. - 1981.-20. - P.243-247.

20. Urabe H., Tominaga Y. Low-frequency collective modes of double helix DRA in the Raman spectra // Ibid. - 1982. - 21. -

P. 2477-2481. 21. Collective vibrational modes in molecular assembly of DNA and its application to biological systems. Low-frequency Raman spectroscopy / H. Urabe, H. Hayashi, Y. Tominaga et al. // J. Chem. Phys. - 1985. - 82. - P. 531-535.

22. Relaxation processes on a picosecond time scale in hemoglobin and poly(L-alanine) observed by millimeter-wave spectroscopy/

L.Gensel, F.Kremer, A.Poglitsch et al. // Biopolymers. - 1983. - 22. - P. 1715-1729.

23. Kremer F., Poglitsch A., Gensel L. The temperature dependence of the millimeter waves absorption by lysozyme // 7-th Int. Conf. Infrared and Millimetre Waves. - Marseille, 1983. -L 2-2.

24. Диденко Н.П., Зеленцов В.И., Ча В.А. О конформационных изменениях биомолекул при взаимодействии с электромагнитным излучением // Эффекты нетеплового воздействия мм излучения на биоло-

гические о̀оъекты / Под ред. Н.Л.Девяткова. - М., 1983.-С.63-77. 25. Каштур В.А., Малеев В.Я., Щеголева Т.Ю. Исследование гидратации глобулярных белков дифференциальным диэлектрометрическим

методом // Молекуляр. биология. — 1976. — 10. № 3.—С.568—575.
26. Малеев В.Я., Кашпур В.А., Щеголева Т.Ю. Диэлектрометрия в миллиметровом дианазоне длин волн как метод исследования вза-имодействия бионолимеров с водой // Нетепловые эффекты мм излучения / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М., 1981. — С. 26—41.
27. Малеев В.Я., Кашпур В.А. Взаимодействие миллиметровых волн с водными растворами нуклеиновых кислот и их компонентов // Эффекты нетеплового воздействия мм излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М., 1983.—С.163—171.
28. Swicord M.L., Davis C.C. Microwave absorption of DNA in the 8-12 GHz region // Riopolymers. — 1982. — 21. — Р. 2453—2460.

29. Chain-length-dependent microwave absorption of DNA / M. L. Swicord, G.S. Edwards, J.L. Sagripanti et al. // Ibid. - 1983. -

22. - P. 2513-2516. 30. О поглощении растворов ДНК в диацазоне 9-12 ГТц / В.Я.Малеев, В.А. Кашпур, Г.М.Тлибицкий и др. // Биополимеры и клетка. -1986. - 2. - C. 35-38.

УЛК 621.3.029.65:577

IO

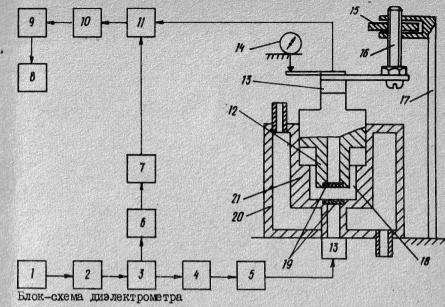
Г.М. Глибинкий. В.А. Кашпур

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИЗЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ B MULTUMETPOBOM JUAILASOHE PACTBOPOB GUOMATEPUAJOB

В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В настоящее время известен ряд работ, посвященных исследованию пиэлектрических свойств биологических веществ в СВЧ диапазоне.Обвор соответствующих данных, выполненный в монографиях /1, 27, позволяет спелать вивод. что одним из наиболее адекватных методов измерения сверхвысокочастотных диэлектрических свойств жидкостей с большими потерями, к числу которых относятся и водные растворы биомолекул. является волноволный метод, основанный на использовании киветы переменной толщины. Применение этого метода измерения позволило нам ранее изучить волные растворы глобулярных белков и JHK /3, 47.

СВЧ диэлектрометрия необходима для исследования механизмов биологического воздействия электромагнитного излучения. Однако, поскольку основным веществом, поглощающим волны миллиметрового (мм) диалазона, является вода, изучение диэлектрических свойств в этой области представляет интерес для выяснения роли растворителя как в поддержании нативной структуры биообъектов при различных температурах, так и во влиянии состояния водного окружения на параметры термических конформационных переходов в нуклеиновых кислотах и белках. До сих пор исследования биособъектов в мм области проводились лишь при комнатных температурах. В связи с этим нами разработан СВЧ диэлектрометр, предназначенный для изучения жидкостей с большими потерями (в том числе растворов биообъектов) в диапазоне 6 - 8 MM.



В измерительном устройстве (рисунок) ситнал с вихода СВЧ генератора 1, состоящего из блока питания и клистрона, подается через ферритовый вентиль 2 на направленный ответвитель 3. с одного выхода которого часть сигнала (-17 дБ) поступает через аттенюатор 6. упругий волновод 7 на направленный ответвитель 44.С другого вихода направленного ответвителя 3 основная часть сигнала полается через измерительный аттенюатор 4, фазовращатель 5 и волноволный переход с прямоугольного сечения на круглое 13 на вход киветы 24. Далее сигнал проходит через нижною прокладку 19, вклеенную в основание кивети, исследуемый раствор 18, верхнию прокладку 19. вклеенную в торец подвижного волновода 12, подвижный волновод переход с круглого волновода на прямоугольный 13 и поступает на ответвитель 11. Суммарный сигнал с этого ответвителя илет на петектор 10, усилитель 9 и цифровой вольтметр 8.

Переход 13 жестко соединен с микрометрическим винтом 16. Вращением гайки 45, помещенной в оправку стойки 47, осуществляется перемещение волновода 41, которое определяется микрометром 14.

Диэлектрометр пригоден для измерений в широком интервале температур 5-90 °C. Температурный режим задает термостат, в котором в качестве рабочей жилкости могут использоваться вода и другие жидкости. Автоматическая регулировка позволяет поддерживать температуру с точностью 0.1 °С. что контролируется термометром в измерительной кювете.

Для проведения частотных измерений вместо клистронного генератора использовался генератор сигналов вноокочастотный Г4—Л41, имеющий рабочий диапазон 37,5-53,57 ГТц (5,7-8 мм).

Основными измеряемыми величинами служат коэффициент поглощения о и фазовая постоянная в . Толщина слоя жидкости вноирается настолько большой, что возникающие в кювете различного рода отраженые волны полностью поглощаются в веществе и не могут доститать детектора. Поэтому условия согласования при перемещении подвижного волновода не изменяются, а увеличение толщины слоя исследуемой жидкости приводит к ослаблению сигнала в экспоненциальной зависимости и изменению фазы в линейной зависимости от пути сигнала в веществе. Коэффициент поглощения определяется при закрытом канале сравнения измерением продетектированных сигналов о и о соответствующим двум толщинам жидкости о и м.

$$\alpha = 4\eta \frac{J_1/J_2}{2(J_2-J_1)}. \tag{1}$$

Фазовая постоянная измеряется обичным мостовым методом, т.е. определяются показания фазоврещателя \mathscr{G}_1 и \mathscr{G}_2 для соответствующих длин слоя вещества \mathscr{K}_1 и \mathscr{L}_2 при установлении нулевого баланса на детекторе:

$$\beta = \frac{\mathscr{C}_2 - \mathscr{C}_7}{\mathscr{L}_2 - \mathscr{L}_7} . \tag{2}$$

Зная величины \propto и β , легко вычислить действительную ε' и мнимую ε'' части комплексной диэлектрической проницаемости для произвольной длины волны

$$e' - \lambda / \lambda_{np} + (\lambda / 2\pi)^2 (\beta^2 - \alpha^2),$$
 (3)

$$\varepsilon'' = 2(A/2\pi) \alpha \beta, \tag{4}$$

где A_{ко} - критическая длина волны.

С помощью данного диэлектрометра нами в мм диапазоне длин волн проведена серия измерений. В качестве объектов были выбраны вода, для которой основные закономерности поведения диэлектрических параметров достаточно хорошо известны, водный раствор одного из сахаров — сахарози и водный раствор сывороточного альбумина — вещества, играющего важную биологическую роль.

В табл. І приведены найденные на длине волны 7,6 мм диэлектрические карактеристики воды в температурном интервале 23-80 °C.Приводимые результаты получены нами впервые, однако в ряде работ /5, 67 на основании измерений в более длинноволновой области вычисляТаблица 1. Термодивлектрические параметри воды (- = 7,6 мм) Таблица 2. Диэлектрические параметры воды (T = = 20°C)

T, OC	α	ß	ει	e"	E _S
23	2,38	4,43	20	31	81
30	2,40	4,77	25	33	80
50	2,27	5,50	37	36	78
60	2,06	5,65	40	34	73
70	1,85	5,67	42	31	67
80	1,68	5,75	44	28	64

7, MM	ď	B	امع	e"
5.8 6.7 7.2 7.5 8,0	2,40 2,33 2,26	4,87 4,34 4,27 4,18 3,89	43 45 47 48 47	23 24 26 27 26

лась величина ε_s , которая может бить сопоставлена с аналогичной величиной, найденной из наших данных. Диэлектрическая проницаемость ε_s является характерным параметром теории Лебая для полярных жидкостей, к которым относятся вода и водные растворы, и представляет собой диэлектрическую проницаемость на частоте, намного меньшей центральной частоти дебаевской дисперсии. Из теории Лебая /7/ следует, что

$$\xi = \mathcal{E}' + \frac{(\mathcal{E''})^2}{\mathcal{E}' - \mathcal{E}_{\infty}},\tag{5}$$

где ε_{∞} — диэлектрическая проницаемость воды на частоте, намного большей центральной частоты дебаевской дисперсии. Здесь $\varepsilon_{s} \approx \mathcal{S}$, а более точные значения в температурном интервале 0-100 °С приведены в работе $\sqrt{67}$. Различие между нашими значениями ε_{s} и известными из литературы $\sqrt{5}$, 67 не превышает 2-3 %.

Выполненный анализ погрешностей экспериментальных данных включает оценку погрешности, которая обусловлена неполным устранением переотражений в кювете, приводящих к нарушению экспоненциальной зависимости затухания и линейной зависимости фазового сдвига от длины слоя исследуемого вещества. Этот анализ показал, что неточность в определении величин α , β и ε_{δ} не превышает 3 %.

В табл. 2 приведена частотная зависимость диэлектрических характеристик, определенная при 20 $^{\rm O}$ С. Видно, что при увеличении длины волны происходит уменьшение коэффициента поглощения и фазовой постоянной. В то же время величины ε' и ε'' монотонно возрастают.

Данные табл. З описывают диэлектрическое поведение 15 %—ного раствора сахарози. Общий характер зависимости всех величин от температуры тот же, что и в случае чистой воды и, очевидно, определяется и в случае раствора молекулами воды. Однако и коэффициент поглошения, и фазовая постоянная изменяются значительно медленнее, чем в случае воды. Так, для воды затухание при 80 ос на 30 % мень—

134

12

Таблица 3. Термодиалектрические параметри раствора сахароэн ($J = 7.6 \, \text{мм}$)

Таблица 4. Термопиэлектрические параметри раствора снвороточного альбумина (4=7.6мм)

T, OC	d	Л	e'	e".	T, OC	d	,8	e!	€"
30 40 50 60 70 80	2.07 2.07 2.04 1.96 1.79 1.66	4,14 4,49 4,72 4,95 5,05 5,20	19 23 26 30 33 35	25 27 28 28 28 26 25	23 30 50 60 65	1,97 1,98 1,92 1,76 1,67	3,95 4,08 4,66 4,83 4,81	47 49 26 30 30	23 24 26 25 23

ше, чем при 30 ^оС, а для раствора сахарозы - только на 20 %. Появление дополнительного поглощения при нагреве может онть обусловлено как изменением взаимодействия сахарози с водой, так и проявлением микроволнового поглошения молекулами сахарозн (например, за счет собственного вращения).

Диэлектрические измерения раствора сывороточного альбумина человека (концентрация 15 %) также указывают на монотонное уменьшение поглошения и увеличение фазового сдвига при нагреве. Измерения проведены до температуры 65 °C, поскольку при дальнейшем нагреве происходит денатурация белка, сопровождаемая гелеобразованием и невозможностью вследствие этого воспроизводимым образом перемещать подвижный волновод в образце. Как видно из табл. 4 температурная зависимость коэффициента поглощения и фазовой постоянной более слабая для раствора белка, чем для чистой воды. Поэтому следует считать, что при повышении температуры изменяются не только свойства воды, но и характер взаимодействия белка с растворителем.

Итак, предлагаемый диэлектрометрический метод позволяет получать важную информацию о свойствах биологических веществ, проявляющихся в поведении диэлектрических параметров в мм диапазоне длин волн.

1. Брандт А.А. Исследование диалектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Физматтиз, 1963. - 404 с. 2. Grant E.H., Sheppard R.J., South G.P. Dielectric behaviour of biological molecules in solution. - Oxford: Clarendon press, 1978. - 237 p.

3. Кашпур В.А., Малеев В.Я., Щеголева Т.Ю. Исследование гидратации глобулярных белков дийференциальным диэлектрометрическим мето-

тлооулярных оелков дипреренциальным диэлектрометрическим методом // Молекуляр. биология. — 1976. — 10, № 3. — С.568—574.

4. О поглошении растворов ДНК в диапазоне 9-12 ГТц /В.Я.Малеев,
В.А.Каштур, Г.И.Глионкий и др. // Биополимеры и клетка. —
1986. — 2. № 1. — С. 35-38.

5. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. — М.:
Изд-во стандартов, 1972. — 412 с.

6. Люомиов Ю.А., Набоков О.А. Комплексная диэлектрическая прони-

цаемость и диэлектрическая релаксация воды вдоль кривой сосуществования // ж.физ.химии. — 1985. — 59, № 6. — С.1435—1436. 7. Дебай П.Полярные молекулы.—М.:Гостехтебретиздат, 1931.—230 с.

VIK 577.35:537

В.С.Банников. О.Ю.Веленский. Г.П.Ермак И.С.Абраменко. О.Л. Колесник, Б.К. Скрынник, В.П. Шестопалов

новый высокоэффективный метол контроля DANKTINOHYTPHOLO COCLOUHNA ENOOEPEKLOB

Исследования функционирования относительно активных нервных систем, таких как, например, аксоны или сетчатка глаза земноводных, сопряжены с серьезными экспериментальными трудностями и осуществляются в большинстве случаев с помощью отведения электрических потенциалов посредством микро- и макроэлектродов от отдельных нервных клеток или групп нейронов. Однако использование для этой цели электродов имеет существенные недостатки: неизбежный травматический эффект, вызванный проколом клеточной мембраны, и неопределенность пространственного расположения электрода в препарате. Частично от этих недостатков можно избавиться при регистрации импульсной активности так называемыми оптическими методами /47. опнако они, в свою очередь, также не лишени серьезних недостатков: более низким, чем в микроэлектролных метолах, отношением сигнал шум, возможностью побочных фармакологических эффектов и фотодинамического повреждения клеток при введении потенциалочувствительных красителей. что сказывается на функционировании нейронов, а также ограничением глубины зондирования, определяемой глубиной проникновения красителей, не превышающей 800 мкм /17. К тому же описанные в литературе оптические методы достаточно условно можно отнести к неинвазивным, хотя бы в связи с упомянутыми побочными фармакологиче окими и фотодинамическими эффектами.

С развитием термовизионной техники, позволяющей проводить дистанционную регистрацию температуры тел по их ИК излучению, получили развитие термовизионные методы анализа тепловых эффектов, связанные с функциональным состоянием нервной ткани [2, 37. Эти методы дали возможность анализировать нервные процессы по изонточному тепловому излучению отдельных нейронов, в частности трансплантанта гиппокампа в передней камере глаза крысы /37. Безусловно, термовизионный метод может стать весьма полезным в исследованиях пространственно-временной организации функционирования биологических систем, однако только в случае процессов, сопровождающихся заметным тепловиделением.

В настоящее время достигнуты заметные успехи в технике миллиметрового (мм) и субмиллиметрового диапазонов волн, связанные с разработкой висококогерентных источников электромагнитных колеба-

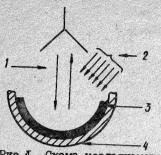


Рис. 1. Схема исследуемого объекта: 4 - СВЧ сигнал; 2 - световой поток; 3 - сетчатка; 4 - глазной бокал

ний, а именно генераторов дифракционного излучения (ГДИ) /Д/. ГДИ может функционировать в виде законченной радиосистемы, выполняющей замкнутый цикл в радиоспектроскопических и дефектоскопических измерениях /5/. Это позволяет ставить вопрос об их применении для диагностики функционального состояния активных биообъектов, в частности нервных систем. Речь идет о локальной микролокации активных биосистем ограниченными пучками электромагнитных воли нетепловой интенсивно-

сти. Этому вопросу и посвящена настоящая работа, в частности возможности бесконтактного определения физиологического состояния изолированного глазного бокала глаза капа temporaria при воздействии импульсов света.

Известно, что электромагнитные волны указанных диапазонов сильно поглощаются биологическими объектами и влияние электромагнитного поля оказывается сосредоточенным в сравнительно узкой зоне на поверхности биологического объекта, причем при соизмеримости длины волны падающего излучения с характерными размерами биологической ткани или биологического объекта в целом поглощение может носить сложный нелинейный характер, определяемый как длиной волны, так и поляризацией, а также ориентацией вектора Пойтинга падающей волны относительно фазового центра биологического рассеивателя, диэлектрическими и геотермическими параметрами последнего. Эти факторы должны учитываться при выборе методик проведения эксперимента.

Предварительные эксперименты показали, что удобным параметром, позволяющим достаточно адекватно описать функциональное состояние изолированного глазного бокала глаза Rana temporaria, может служить коэффициент отражения электромагнитной волны, испытывающий сильное приращение при прохождении нервного импульса, вызванного световым сигналом.

Изолированний глазной бокал (рис.1) можно представить, согласно А.Л. Бызову f6f, как полупроводниковую структуру, сопротивление которой f2 650 Ом.При проведении нервного импульса в сетчатке открываются ионные каналы и по ее поверхности и в подповерхностных слоях L 200 мкм появляются токи, ответственные за проведение потенциала действия.При облучении глазного бокала в мо-

мент проведения сетчаткой нервного импульса изменяются граничные условия, обусловленные наличием на границе разделя поверхностного тока. Это приводит к скачку нормальной компоненты вектора электрической напряженности и тангенциальной компоненты вектора напряженности магнитного поля.

Изолированный глазной бокал представляет собой незамкнутую сферическую поверхность, причем облучение электромагнитной волной производится со стороны сферической полости объекта, т.е. со стороны сетчатки (см. рис. 1). Известно, что в подобной структуре возникают только волны гибридного типа 277, имеющие все шесть компонент электромагнитного поля.

Поле, отраженное от изолированного глазного бокала, на приемнике в скалирном приближении Кирхгофа для магнитного потенциала Дебая $\Pi_s^{m}(r,\theta,\varphi)$ представляется в виде

$$I_{S}^{m}(r,\theta,\varphi) = \sum_{S} \int_{R} I_{i}^{m}(r,\theta,\varphi) \frac{\partial J(r,\theta)}{\partial n} dS_{R} + \int_{S} J(r,\theta) \frac{\partial I_{i}^{m}(r,\theta,\varphi)}{\partial n} dS_{R}, \qquad (1)$$

где $n_i'''(r,\theta,\varphi)$ – падающая на объект волна; $J(r,\theta)$ – функция Грина сферической полости.

Первый член в выражении (1) определяет отражение от биологического рассеивателя при отсутствии нервного импульса, т.е. когда скачок нормальной производной на границе раздела равен 0:

$$\frac{\partial \Pi_{i}^{m}(r,\theta,\varphi)}{\partial n} \bigg|_{\Omega} = 0. \tag{2}$$

Второй член в (1) определяет отражение от биологического рассеивателя при проведении им нервного импульса. Однородное условие Неймана в этом случае заменяется смещанным граничным условием

$$\frac{\partial \Pi_{i}^{m}(r,\theta,\psi)}{\partial n} + g(r,\theta,\psi)\Pi_{i}^{m} = 0, \tag{3}$$

а функция $g(r, \theta, \varphi)$, определяющая возмущение границы раздела, является непрерывной функцией поверхностных координат 77.

Таким образом, из (1) и (3) видно, что приращение полного поля на приемнике определяется только поведением функции поверхностного возмущения $g(r, \theta, \varphi)$

$$\Delta \Pi_{S}^{m} = \int \int_{S_{0}}^{\infty} \int_{r_{i}}^{m} \left(\frac{\partial J(r, 0)}{\partial n} \right) - J(r, 0) g(r, 0, 4) dS_{R},$$

так как апертурная функция ${\mathbb Z}_i^{m}(r,\,\Theta,\,arphi)$ и функция Грина, а также ее

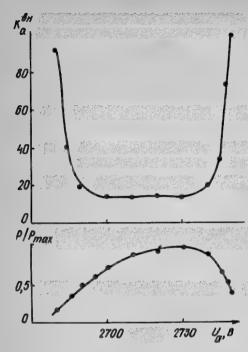


Рис. 2. Зависимость коэффициента автодинного усиления и мощности генерации ГДИ от ускоряющего напряжения

нормальные производные являются неизменными величинами при одних и тех же геометрических размерах объекта,ориентации его относительно вектора Пойтинга падающей волны. поляризации и плины волны электромагнитных колебаний.

Сигнал, отраженный от исследуемого объекта, измерялся радиолокационным методом с помощью высококогерентного ГЛИ автолина /57 мм диапазона с внешним детектированием Сигнала.

Как известно, автолинные ГДИ позволяют осуществлять излучение и прием отраженных от исследуемых объектов сигналов в строго обратном направлении по одному волновелушему тракту, связывающему антенну с СВЧ вывопом энергии. При этом ГЛИ автолин совмещает функции пере-

патчика, усилителя СВЧ сигнала, гетеродина и смесителя. Реакция автодина на принимаемий сигнал проявляется в виде автодинного отклика колебаний его резонансной системы. Причем величина этого отклика может значительно (в несколько сот раз) превышать амплитуду принимаемого сигнала. Выражение для амплитуды автодинного сигнала имеет вил

$$\alpha(t) = -\frac{r}{2} R_{\alpha} A_{\alpha} \cos \left(\theta - \Psi_{\tau}\right),$$

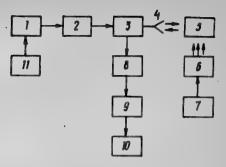
 коэффициент отражения;
 коэффициент автодинного усиления, показывающий, во сколько раз амплитуда 🗸 автодинного отклика превышает амплитулу / Д отраженного сигнала; в - суммарный сдвиг фази излученного и отраженного сигналов; 📜 = 🕠 t для неподвижных объектов равен нулю.

При внешнем детектировании автодинный сигнал измеряется на детекторе, включенном в одно из плеч треклециоельного ответвителя. Отношение и к невозмущенной амплитуле **Л** определяется выражением 18

a/A = - [N = cosd.

Значение козболимента автодинного усиления и висит от выбора рабочей точки в пределах зоны генерации ГЛИ. На рис. 2 приведены типичные за-BUCKMOCTH KAN IN MOUHOCTH генерации / от ускоряющего напряжения в пределах зоны электронной перестройки ГШИ авев воны генерации, что способствует предварительному усилению принимаемых сигналов и увеличению соотношения сигнал шум на выходе автолинного приемопередатчика.

Характеристики биообъектов определялись на установке (рис.3) Сигнал ГДИ автолина 4 через ответвитель 3 и рупорную антенну 4 излучался в направлении глазного бокала 5 и, отра-MARCE OT HETO, BOSBDAMAJICA HO тому же волноводному тракту в ГДИ. Воздействие световым импульсом осуществлялось ламнойвспышкой 6, установленной в непосредственной олизости от муда / исследуемого объекта, помещен-



тодина. Как видно, мет суще— Рис.3. Структурная скема установки: 2— согласущий траноформатор; ?— ственно возрастает волизи кра— одок управления; 9— усилитель; ИПЛ ВИНВТИП ЯОКО - 11

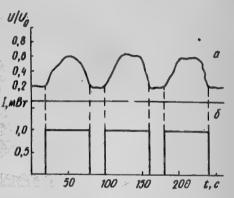


Рис. 4. Изменение автолинного отклика / от возлействия светового сти-

ного в центре круглого лучевода на подвижной согласованной нагрузке. Регистрация автодинного отклика производилась полупроводниковым детектором 8, включенным во второе плечо ответвителя 3. Продетектированный сигнал после усиления записывался самописпем 10.

В этом эксперименте объект устанавливался в положение максимального отражения падающей электромагнитной волны. Сетчатка изолированного глазного бокала возбуждалась световым стимулом интенсивности / = 1 мВт с частотой следования 0,05 Гц и плительностью

Экспериментальные данные изменения автодинного отклика // от

светового стимула 7 приведены на рис. 4. Отмечается заметное изменение коэффициента отражения при включении и выключении возбуж-Дающего светового стимула (рис. 4.6) и адекватного ему прирашения автодинного сигнала (рис. 4,а). Одной из возможных причин приращения отраженного сигнала является взаимодействие электрических и магнитных мультиполей, индушированных в биологическом объекте падающей электромагнитной волной с микрополем, обусловленным проведением сетчаткой нервного импульса. Не исключено также, что палающая волна может эффективно взаимольйствовать с генерируемой светом плазмой ионов в фоторецепторных клетках сетчатки.

Более детальные эксперименты, по мнению авторов, позволят установить механизмы возникновения регистрируемого сигнала и расширить область применения методики микролокации на более широкий класс объектов и процессов в биосистемах.

Ягодин С.В., Ноздрачев А.Д., Пушкарев Ю.П. Проблемы фоторегистрации электрических процессов в нервных сетках // Успехи физиол. наук. - 1986. - 17, % 4. - С. 111-115.
 Термоответы мозга на сенсорную стимуляцию / К.П.Будко, Э.Э.Годик, А.М. Горбач и др. // Докл. АН СССР. - 1984. - 278, % 2. - С. 486-491.

3. Тепловая активность изолированного фрагмента мозга / Е.П.Хиж-няк. А.Г.Брагин, Г.Р.Иваницкий и др. // Биофизика. — 1986. — 31. 16 5. — С. 897—901.

4. Шестопалов В.П. Физические основи миллиметровой и субмиллиметровой техники: В 2 т. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 2. – 256 с.

5. Автодинный эффект в генераторе дифракционного излучения / Г.П. Ермак, А.Б. Леседев, К.А. Лукин и др. // Изв. вузов. Радиофизика. — 1986. — 29, № 8. — С. 957—966.
6. Бызов А.Л. Электрофизические исследования сетчатки. — М.: Нау-ка, 1966. — 90 с.

7. Шестопалов В.П. Сумматорные уравнения в современной теории лифракции. - Киев: Наук. думка, 1983. - 252 с.

УДК 538.569:57

С.В. Шияновский

CIINHOBHM MEXAHUSM BJUNHUN MUJJINMETPOBOTO ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

За последние 20 лет накоплен общирный экспериментальный материал о влиянии низкоинтенсивного излучения миллиметрового диапазона на жизнедеятельность различных организмов 21-77. Однако сложность изучаемых объектов и противоречивость экспериментальных данных не позволили к настоящему времени выяснить первичный механизм воздействия миллиметрового излучения (ММИ) на молекулярном уровне, не говоря уже о последующей цепи реакций в високоорганизованных орга-HUSMAX.

Анализ имеющихся экспериментальных результатов показывает /87, что все наблюдаемые эффекты влияния ММИ на различные биологические объекты можно разделить на две группы. Первая зависит главным образом от интенсивности поглошенного излучения и не имеет специфических частотных особенностей. Вторая группа эффектов отличается прежде всего резонансной зависимостью от частоти излучения. Отношение ширины резонанса к частоте составляет обычно 40^{-2} — 40^{-4} , причем для резонансных эффектов характерна пороговая зависимость от интенсивности излучения и длительности облучения.

Наблюдение резонансных эффектов на биологических объектах всех уровней, вплоть до одноклеточных, позволяет сделать предположение о существовании универсального резонансного механизма воздействия ММИ на молекулярном уровне. В работе /9/ была высказана гипотеза, что этот механизм может быть обусловлен взаимолействием магнитной составляющей ММИ со спиновой подсистемой промежуточных продуктов биохимических реакций. Подтверждают эту гипотезу эксперименты по влиянию резонансного поглощения СВЧ поля на физические процессы и химические реакции /10-127. Недавно Кайлманом /137 онла сделана попнтка численного описания экспериментальных результатов /14-167 в рамках спинового механизма. Автору упалось достичь количественного согласия с экспериментальными панными, однако он пренебрет процессами релаксации между подуровнями. Поэтому справедливость результатов работы /13/ и вообще эффективность воздействия ММИ через спиновую подсистему /97 определяются тем, насколько существенной оказывается релаксация между спиновыимкнеосудоп им

Цель настоящей работн - анализ кинетики заселенности триплетных подуровней и определение скорости релаксации между подуровнями, обусловленной вращением молекул.

1. Кинетика заселенности спиновых подуровней под облучением. Влияние постоянного и переменного магнитных полей на спиновую подсистему обычно рассматривается в рамках двух механизмов: радикального и триплетного. Радикальный связан с изменением полного спина системы, состоящей из двух слабосвязанных частей с ненулевыми спинами. Триплетний механизм обусловлен изменением заселенности подуровней мультиплета (обычно триплета).

Следует отметить, что возможность синглет-триплетных переходов в радикальных парах (РП) обусловлена тем, что радикалы значительную часть времени существования РП находятся на большом расстоянии друг от друга, так что энергии синглетного и триплетного состояний оказываются одинаковыми. Поэтому наблюдается резонанс на нулевой частоте, обеспечивающий эффективное влияние постоянного магнитного поля. В то же время отсутствие в дублет-дублетных РП внергетических уровней с зазором, соответствующим ММИ, не позволяет рассчитывать на резонансное взаимодействие ММИ с РП.

Триплетный механизм может реализоваться, поскольку на промежуточных сталиях биохимических процессов достаточно часто образуются молекули и комплексы со спином $S \gtrsim 4$. В дальнейшем будем рассматривать триплетное состояние, котя полученные результаты справедливи и для состояний с более високой мультиплетностью. Триплетное состояние имеет три подуровня, энергии которых слегка различаются вследствие электрон-электронного взаимодействия так называемое расшепление в нулевом поле (РНП). Между подуровнями разрешены магнитодипольные переходы. Частоты переходов между подуровнями сильно зависят от электронной структури молекул. Для большинства органических молекул, как и для пуринов и пиримилинов, частоти переходов лежат в диапазоне 1-10 ГГц /177. Для производных нитрена эти частоты достигают 50 ІТц, а для металло-протемновых комплексов (типа миоглобина) - 300 Пти /187. Из привепенных значений частот видно, что ММИ может резонансно возбуждать переходы между подуровнями и менять их заселенность.

При комнатной температуре равновесная заселенность подуровней практически одинакова, поскольку разность энергий подуровней не превышает 10-2 Тл. Поэтому влияние ММИ в равновесных условиях пренебрежимо мало. Однако при образовании триплетных молекул оптическими и жимическими способами скорость заселения подуровней существенно различна. Если в триплетном состоянии происходит разветвление цепей реакций (а именно такие состояния представляют для нас интерес), то вероятности ухода в определенный канал с различных подуровней также будут различаться. Поэтому в условиях постоянной накачки и гибели триплетов ММИ может изменять заселенность подуровней и распределение между каналами.

Рассмотрим кинетику заселенности подуровней с помощью уравнений Блоха (рисунок). Такое описание справедливо, если время поперечной релаксации Т₂ мало по сравнению с характерными временами изменения заселенности:

$$\dot{a}_{i} = B_{i} - (k_{i} + r_{i}) n_{i} + \sum_{i \neq j} (W_{j}; n_{i} - W_{j}; n_{i}), \qquad (1)$$

где δ_i и k_j соответственно скорости заселения и распада подуровня i; r_i - скорость химической реакции на подуровне i

Скорость переходов между подуровинии $W_{ij} = \rho_{ij} + M_{ij}$ определяется спин-решеточной релаксацией ρ_{ij} и магнитодипольными переходами M_{ij} стимулированными мми.

Рассмотрим случай, когда частота ММИ У близка к частоте 12 перехода между уровнями I и 2. Скорость радиационного перехода 12 описнвается формулой

где $f = 4.912 \cdot 10^{41} \text{ м}^2 \cdot \text{B}^{-1} \text{ к}$ кс — гиромагнитное отношение электронов; H_t — амплитуда магнитного поля H_t H_t соз $2\pi \sqrt{t}$; f — форма резонансной линии поглощения $(4/4) d \sqrt{t} = 1$.

В работе [13] в предположении малости спин-решеточной релаксации проанализировано стационарное решение системы (1) и найдена полная
скорость реакции $R = \sum_i r_i r_i$

В отсутствие ММЙ скорость реакции

Схема кинетических процессов на три-

$$R_0 = \frac{B_7}{1 + k_1/r_1} + \frac{B_2}{1 + k_2/r_2} + \frac{B_3}{1 + k_3/r_3}$$
 (3)

В условиях насыщающего ММИ

$$R_{g} = \frac{B_{1} + B_{2}}{1 + (k_{2} + k_{3})/(r_{2} + r_{3})} + \frac{B_{3}}{1 + k_{3}/r_{3}}$$
(4)

Таким образом, существует критическая интенсивность ММИ (I_c), такая, что при $I \ll I_c$ эффект отсутствует, а при $I \gg I_c$ он не зависит от интенсивности. Велична I_c может быть найдена из условия $M_{12} = I_{12}^{-1}$, где $I_{12} = (K_1 + I_2)^{-1} + (K_2 + I_2)^{-1}$ — некоторое эффективное время жизни триплета. Используя формулу (2) и выражение $I = e_{12} H_c^2 / I_c$ получаем в резонансе лоренцевой кривой с полушириной I_c

$$I_{c}[B_{7}/M^{2}]=6,217\cdot10^{-9} \text{ av }[14]/\tau_{n}[0].$$
 (5)

Формула (5) использовалась для анализа экспериментальных ре-

23

вультатов работ $\sqrt{15}$, $\sqrt{167}$. Измеренное 10 %—ное изменение скорости роста дрожжей объяснить нетрудно, так как величины R, R, и R, могут различаться на порядок для разных подуровней Сложнее объяснить наблюдаемое значение интенсивности $L_c = 10$ Вт/м². Кайлман $\sqrt{137}$ предположил, что ширина резонансной линии поглошения совпадает с шириной максимума частотной зависимости роста дрожжей R = 8 МГп. В этом случае из (5) следует, что $L_{12} = 5 \cdot 10^{-3}$ с. Найденное значение L_{12} согласуется с возможными значениями R, и R, однако необходимо отметить, что формулы (3) и (4) получены при условии малости спин—решеточной релаксации R, R, R, дегко видеть, что при выполнении обратного неравенства R, устанавливается равновесие между подуровнями и ММИ не может дать никакого эффекта.

Таким образом, справедливость результатов работи [13] и вообще эффективность воздействия ММИ через спиновую подсистему [9] определяются окоростью спин-решеточной релаксации между подуровнями. Если скорость релаксации выше определенного значения ρ_{max} то спиновый межанизм не может описать экспериментальные результать. Величина ρ_{max} может быть найдена из формулы (5) при учете того, что $\Delta V \gg \Gamma_D^{-1}$:

$$P_{max} [c^{-1}] = 1,29.10^4 \sqrt{I_c} [87/M^2].$$
 (6)

Поэтому даже проанализированы основные механизмы спин-решеточной релаксации в биологических структурах и рассчитан вклад вращения молекул в релаксацию.

2. Спин-решеточная релаксация между триплетными подуровнями. Для возникновения спин-решеточной релаксации необходимо существование некоторого нестационарного взаимодействия со спиновой подсистемой. В твердых телах наиболее эффективные релаксационные процессн обусловлены колебаниями решетки, в жидкостях — поступатель ным и вращательным движениями молекул.

В биологических структурах трансляционная диффузия, по-видимому, не должна играть существенной роли, так как для больших макромолекул она заторможена и слабо влияет на параметры спиновой
подсистемы. Для изучения влияния вращения рассмотрим подробнее
особенности триплетных состояний в органических молекулах и металлоорганических комплексах.

Триплетное состояние образуется двумя неспаренными электронами. Основными взаимодействиями, зависящими от спинового состояния электронов, являются зеемановское взаимодействие с внешним постоянным магнитным полем, спин-орбитальное и взаимодействие магнитных диполей этих электронов. Для органических молекул соответствующая часть гамильтониана записывается в виде 2197

$$\mathcal{R}=g\beta H(\vec{S_1}+\vec{S_2})+g^2\beta^2\left[\frac{(\vec{S_1},\vec{S_2})}{R^3}-\frac{3(\vec{S_1},\vec{R_1})(\vec{S_2},\vec{R_1})}{R^5}\right],\tag{7}$$

где g - g-фактор; β - магнетон Бора; \widehat{R} - вектор, соединяющий два электрона.

Для получения эффективного спин-гамильтониана необходимо вычислить матричные элементы гамильтониана и выразить их через компоненты полного спина системы

$$\mathcal{Z}_{s} = g_{\mathcal{B}} H S + S \hat{\mathcal{D}} S, \tag{8}$$

где J — симметричный тензор, называемый тензором РНП. Его компоненты имеют вид

$$\mathcal{D}_{ij} = \frac{1}{2} g_{,\beta} \langle \psi \mid \frac{R^2 \delta_{ij} - 3R_i R_j}{R^5} \mid \psi_o \rangle, \tag{9}$$

где 4 волновая функция электронов.

Для ионов переходных металлов в металлоорганических комилексах эффективный спин-гамильтониан также описывается формулой (8), но тензор $\mathcal D$ обусловлен спин-орбитальным взаимодействием:

$$D_{ij} = -\frac{1}{5} \frac{\langle \varphi_0 | \mathcal{L}_i | \psi_n \rangle \langle \psi_n | \mathcal{L}_n | \psi_0 \rangle}{\mathcal{E}_n - \mathcal{E}_0}, \tag{IO}$$

где ξ — константа спин-орбитального взаимодействия; ξ_n и ψ_n — соответственно энергия и волновая функция возбужденного состояния n.

В системе координат, в которой тензор \hat{D} диагонален, спин-га-

$$\mathcal{R}_{e} = g_{\beta} H \cdot S - [\mathcal{E}_{x} S_{x}^{2} + \mathcal{E}_{y} S_{y}^{2} + \mathcal{E}_{z} S_{z}^{2}]. \tag{11}$$

Главной качественной особенностью спин-гамильтониана (11) является то, что зеемановский член и слагаемое в квадратных скобках имеют различные наборы собственных функций. Для зеемановского слагаемого собственными будут функции \mathcal{L}_1 , \mathcal{L}_2 , \mathcal{L}_3 , \mathcal{L}_4 с фиксированными значениями проекции спина на направление магнитного поля. В случае нулевого магнитного поля собственными функциями и энергиями являются \mathcal{L}_4 и \mathcal{E}_4 ($\alpha = x, y, z$). Индексы x, y, z указывают, что для этих функций равны нулю проекции спина на соответствующие оси системы координат, в которой диагонален тензор \mathcal{L}_4 .

Необходимо отметить, что если собственные функции зеемановского взаимодействия имеют постоянную ориентацию, то собственные функции дипольного взаимодействия электронов связаны с осями молекулы. Поэтому вращение молекулы приводит к нестационарному сдвигу энергетических уровней и интенсивным переходам между ними.

Влияние вращения на спин-решеточную релаксацию широко изучалось в связи с экспериментами по ЭПР и ЯМР (20). Однако между выполненными исследованиями и рассматриваемым в данной работе случаем имеется существенное различие. Измерения спектров ЭПР и ЯМР
проводятся в сильных постоянных магнитных полях, когда зеемановское расшепление, как правило, превышает РНП. В этих условиях
взаимодействие магнитных диполей электронов играет роль оператора
нестационарного возмущения, зависящего от ориентации молекулы, и
скорость перехода между подуровнями связывается пропорциональной
квадрату РНП.

В случае, когда постоянное магнитное поле отсутствует, вращение молекули не приводит к изменению спектра триплета. Причиной спин-решеточной релаксации является неадиабатичность вращения по отношению к пережодам между подуровнями. Для расчета воспользуемся нестационарным уравнением Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \mathcal{R}_{0} \Psi, \tag{12}$$

где $\mathcal{H}_0 = -\mathcal{E}_X S_X^2 - \mathcal{E}_Y S_Z^2 - \mathcal{E}_Z S_Z^2 -$ опин-гамильтониан в отсутствие магнитного поля. Представим \mathcal{H} в виде разложения по собственным функциям \mathcal{H}_0 в молекулярной системе координат

$$\Psi = \sum_{j} N_{j} T_{j} \exp\left\{-\frac{i}{\hbar} \delta_{j} t\right\}. \tag{33}$$

Поскольку / преобразуются как орты декартовой системы координат

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = e_{ijk} \mathcal{R}_j T_k$$
 (14)

где \mathcal{Q}_j вектор угловой скорости в молекулярной системе координат, то получим систему уравнений для коэффициентов \mathcal{A}_i :

$$\frac{\partial A_{i}}{\partial t} = \delta_{ijk} \, \mathcal{D}_{ij} \, A_{k} \, \exp\left\{-\frac{i}{\hbar} \left(\delta_{k} - \delta_{i}\right) t\right\}. \tag{15}$$

Рассмотрим переход из состояния T_{χ} ($A_{\chi}(0)=1$, $A_{\chi}(0)=0$, $A_{\chi}(0)=0$). В первом порядке теории возмущений

$$A_{g}(t) = \int_{0}^{\infty} \Omega_{x}(t_{j}) e^{-2\pi i v_{xy} t_{j}} dt_{j}. \tag{16}$$

Вероятность нахождения системы в состоянии / в момент времени 26

$$P_{y}(t) = |A_{y}(t)|^{2} = \int_{0}^{\infty} dt, dt_{2} Q_{x}(t_{1}) \Omega_{x}(t_{2}) e^{-2\pi i V_{xy}(t_{2} - t_{2})}. \tag{17}$$

В предположении, что коррелятор имеет экспоненциальный закон затухания $\langle \Omega_z(t,+\Delta t) \Omega_z(t,) \rangle = \langle \Omega_z^2 \rangle e^{-Mt^4/T_z}$, найдем вероятность перекода

$$P_{xy} = \langle \Omega_z^2 \rangle \frac{2\tau_z}{1 + (2\pi)_{xy} \tau_z^2}. \tag{48}$$

Из закона равнораспределения $\frac{1}{2} I_2 < Q_2^2 > \frac{1}{2} I_5$ г следует, что средняя угловая скорость $\bar{Q}_2^2 \sqrt{\langle Q_2^2 \rangle}$ примерно обратно пропорциональна массе молекулы. Для молекулы с массой 10^5 а.е.м. $\bar{Q}_2 \approx 10^9$ с $^{-1}$. Поэтому в качестве приемников ММИ через спиновую подсистему могут выступать только крупные молекулы или комплексы, обладающие большим РНП. По-видимому, единственными возможными кандидатами являются комплексы ионов переходных металлов, в которых скорости спин-решеточной релаксации I_{ij} могут находиться в диапазоне $10^3 - 10^5$ с $^{-1}$. Такие комплексы – важная структурная единица целого ряда ферментов, и они активно участвуют в биохимических реакциях.

Поскольку в реальных условиях всегда присутствуют слабне постоянные магнитние поля (например, поле Земли), целесообразно рассмотреть вклад зеемановского слагаемого в релаксацию. В этом случае для коэффициентов жеможно записать

$$\frac{\partial A_{i}}{\partial t} = e_{ijk} \left(\Omega_{j} + g_{jk} H_{j} \right) A_{k} exp \left\{ -\frac{i}{\hbar} \left(\mathcal{E}_{k} - \mathcal{E}_{i} \right) t \right\}, \tag{19}$$

где Н - проекции магнитного поля на молекулярные оси.

В изотропной структуре отсутствует корреляция между ориентацией молекулы и ее угловой скоростью, поэтому, проводя аналогичные вычисления, получаем

$$P_{xy} = \frac{2\bar{\Re}_{\chi}^2 \, \bar{\tau}_z}{1 + (2\pi \, v_{xy} \, \bar{\tau}_{\chi})^2} + \frac{2g^2 \beta^2 \, H^2 \, \bar{\tau}_z}{3[1 + (2\pi \, v_{xy} \, \bar{\tau}_{\chi})^2]}, \quad (20)$$

где $\tilde{\ell}_{\chi}$ — корреляционное время ориентации молекулярной оси z, причем $\tilde{\ell}_{\chi} \neq \tilde{\ell}_{\chi}$ (как правило $\tilde{\ell}_{\chi} > \tilde{\ell}_{\chi}$).

Поскольку $g\beta = 35.2$ кГц \cdot м/А, постоянные магнитные поля. не превышающие 2 кА/м, не вносят существенного вклада в релаксацию.

Виволи

- 1. Условие малости спин-решеточной релаксации является наиболее принципиальным для реализации спинового механизма воздействия ММИ на биологические объекты.
- 2. Металлоорганические комплекси нонов переходных металлов с большими РНП, по-видимому, единственные кандидаты на роль спиновых рецепторов ММИ в живых организмах.
- 3. Постоянные магнитные поля, не превышающие 2 кА/м, не оказывают существенного влияния на спин-решеточную редаксацию.

Работа выполнена в рамках программы временного коллектива "Отклик. Автор благодарен В.И.Сугакову и участкикам теоретического семинара ВК "Отклик" за полезные обсуждения получениях резуль-TATOB.

Научная сессия Отпеления общей физики и астрономии АН СССР// Успехи физ. наук. — 1973. — 110, № 3. — С. 452—469.
 Tyler F.E. Biological effects on honionizing radiation // Ann. Acad. Sci. N.Y. — 1975. — 247. — P. 21—25.

3. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Пол ред. Н. Л. Левяткова. - М.: Ин-т рапиотехники и электрон. АН СССР. 1981. -

4. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на обологические аспекты / Под ред. Н.Л. Девяткова. — М.: Ин-т радиоэлектрон. АН СССР, 1983. — 230 с.

5. Проблемы экспериментальной и прикладной электромагнитобиологии. — Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983. — 209 с.

6. Применение милиметрового излучения низкой интенсивности в обиологии и медицине / Под ред. Н.Д. Девяткова. — М.: Ин-т радиоэлектрон. АН СССР, 4985. — 221 с.
7. Биологические эффекти электромагнитных полей. Вопросы их использования и нормирования. — Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 4986. —

- 8. Девятков Н.Д., Бецкий О.В., Голант М.Б. Научное обоснование возможности использования электромагнитных излучений миллиметрового диапавона малой мощности в медицине и биологии / Биологические эффекты электромагнитных полей. Вопр. их использования и нормирования. - Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986. -C. 75-94.
- 9. Ситько С.П., Сугаков В.И. О роли спиновых состояний белковых молекул // Докл. АН УССР, Сер. А. 4984. № 6. С. 65-66. 10. Франкевич Е.Л. Спиновые эффекты в элементарных процессах химии высоких энергий // Химия высоких энергий. 1980. 14, № 3. С. 195-210.
- 11. Франкевич Е.Л. Магнитно-резонансная модулниция скоростей реак-ийй // Нетепловне эффекты миллиметрового излучения / Под ред. Н.Л. Леваткова. М. 1981. С. 204-248. 12. Olarke R.H. Triplet state ODMR spectroscopy. New York: Wi-ley, 1982. 158 p.

13. Kielmann F. Triplet-selective chemistry : a possible cause of biological microwave sensitivity // T. Naturforsch. C. -1986. - 41. - P. 795-798.

14 Grundler W. Lielmann F., Fröhlich H. Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves //Phys.

Lett. A. 1977. 62. P. 463-466.

15. Grundler M. Kielmann F. Nonthermal effects of millimeter microwaves on yeast growth // Z. Naturforsch. 0. - 1978. -33. - P. 15-21.

46. Grundler W. Kielmann F. Sharp resonances in yeast growth 16. Grundler W., Kielmann F., Sharp resonances in yeast growth prove nonthermal sensitivity to microwaves // Phys. Rev. Lett.— 1983. — 51, N 13. — P. 1214—1216.

17. Мак-Глинн С., Адзуми Т., Киносита М. Молекулярная спектроско— пия триплетного состояния. — М.: Мир, 1972. — 448 с.

18. Ингрэм Д. Электронный параматнитный резонано в биологии. — М.: Мир, 1972. — 296 с.

19. Керрингтон А., Мак-Лечлан Э. Магнитный резонано и его примене— ние в кимии. — М.: Мир, 1970. — 447 с.

20. Абрагам А. Ядерный магнетизм. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.—

557 c.

VIIK 576.345:581.5:575.042

Н.Г. Пестопалова, Л.Н. Головина, А.А. Петрушин, В.К. Корнеенков РЕАКЦИЯ КЛЕТОК РАСТЕНИЙ НА ЛЕЙСТВИЕ РАЛИОВОЛН MULTIMETPOBOTO JUANASOHA

Научно-технический прогресс сопровождается постоянно увеличиваюшимся антропотенным влиянием на биосберу. Важным новым экологическим фактором, действующим на растения. животные и микроорганизмы, является электромагнитное излучение радиочастотного диапазона. Изучение механизмов повреждения, репарации и адаптации клеток к изменнющимся условиям внешней среды - одна из важнейших проблем современной биологии. Большая часть сведений о влиянии радиоволн на клетки и организми получена в опитех с лабораторными животными и микроорганизмами /1. 2. 5. 7. 87.

Цель настоящей работи - изучение вличния радиоволя миллимет-POBOTO (MM) MUANASOHA HA KOMILIEKO BSAKMOCBASAHHAX MOKASATEJEK.ONределяющих размножение клеток растений и косвенно отражающих активность их генома - митотические инцекси. частоту клеток с хромосомными аберрациями и синтез ДНК.

Основные результаты по интенсивности деления клеток получены нами при изучении модельных и практически важных объектов дука и креписа. Облучению подвергали точки роста первичных корешков семян гибридного лука Золотой шар х Призовой. Учет количества митозов проводили в меристеме корешков при прорастании семян или (значительно реже) дуковиц. Корешки были выбраны потому, что их ткани отличаются четкостью строения. Это позволило ряку авторов построить математические модели роста и деления клеток в них.

Интенсивность деления является одним из объективных тестов, характеризующих чувствительность клеток к различного рода воздействиям. Учет этого показателя дает значительную информацию о карактере и степени изменений, происходнщих в организме после облучения. О влиянии радиоволн на процесон размножения клеток растений имеются лишь единичные обобщения /9,10/. Исследования, где он чувствительность меристематических клеток оценивалась с учетом времени воздействия и физиолого-генетического состояния объекта, практически отсутствуют. Представляло интерес проследить кинетику клеточного размножения в течение первых митотических циклов при прорастании семян, сопоставить эти данные о результатом цитогенетического анализа — состоянием хромосом и интенсивностью синтеза ДНК.

Для решения поставленной задачи облучению подвергали сухие семена и точки роста зародишевых первичных корешков лука (Allium сера L.), конских бобов (Vicia faba L.) и скерды (Crepis capillaris).

Для облучения сухих и проросших семян использовалась специальным образом сконструированная установка, позволяющая контролировать распределение, интенсивность, частоту и поляризацию ноля, которое непосредственно взаимодействует с объектом. Основным узлом этой установки является конфокальный открытый резонатор, в рабочий объем которого на подвесках, прозрачных для электромагнитных волн, помещались семена. Контроль за параметрами поля осуществлялся разработанным метолом визуализации полей в открытых резонатораж. С помощью этого метода удается непрерывно следить за видимой картиной электромагнитного поля открытого резонатора, свободного от исследуемого объекта и при наличии его. Это позволяет создавать равные условия для облучения. Воздействин на семена и точки роста первичных корешков проводили в четырехмиллиметровом диапазоне длин волн; плотность потока мощности порядка 30 мВт/см. Фиксация опитного и контрольного материала начинали при появлении первых митозов (что было установлено специальными опытами) и проводили несколько раз в течение суток через каждые З ч. Для фиксации использовали ацеталкоголь (3:1). На каждую точку фиксации отбирали 8-10 корешков, из которых готовили давленые постоянные и временние препараты, окрашенные реактивом Ширфа по Фельгену, ацетоорсеином или апетолакмоидом. Изучали 3-7 тнс. клеток каждой формы на один срок фиксации.

Результати показали, что облучение сухих семян в четырехмиллиметровом диапазоне по-разному влияет на гибридний лук и его искодние формы — сорта Золотистый и Харьковский. Радиоволны незначительно изменяют темпы пролиферации исходных сортов, но задерживают на 8-10 ч вступление клеток в первый митоз у гибридной формы.
В последующие сроки, к 20-му часу роста, задержка деления компенсируется его вспышкой и митотический индекс в опыте выше контрольного на 22 %. Угнетающий эффект радиоволн, наиболее четко выражен-

ний у гибрида, имеет обратимий характер.

Аналогичные результати, свидетельствующие об угнетении первых клеточных делений и обратимости изменений, получены и в опыте с гибридным луком Стругановский х Красный круглый. На рис. I показано, что в опытном варианте появление первой волны митозов на 6 ч позже по сравнению с контролем, а среднее значение митотической активности ниже почти в два раза.

1

Известно, что клетки основной меристемы корней проростков отличаются повышенной чувствительностью. Об этом свидетельствуют данные ряда авто-

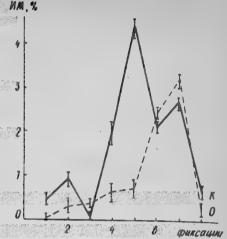


Рис. 1. Изменение митотической активности клеток в течение первых митотических циклов при прорастании семян: 0 - опыт; K - контроль

ров, изучавших воздействие на процесси клеточного размножения гам-ма-радиации и химических веществ 237. Материалы настоящей расоты показывают, что радиоволны мм диапазона (в использованном режиме) также являются ингибиторами репродукции клеток, что совпадает с данными о подавлении экспрессии генов под влиянием радиоволн 277.

Падение митотической активности в первые часы и дни после воздействия может быть связано с повреждением хромосом, уменьшением числа клеток, вступающих в митоз, а также торможением про-хождения фаз митотического цикла.

Здесь уместно отметить, что задержка митозов была также обнаружена и после действия рентгеновских лучей. УФ радиации и других физических факторов [4].

Можно предположить, что использованный в работе вид излучения особой специфичностью не обладает и снижение митотической активности обусловлено физиологическим состоянием популяции чувствительных делящихся клеток. Обратимый карактер изменений связан, по-видимому, с репопуляционным восстановлением.

Хромосомные аберрации в клетках корневой меристемы учитывали в основном анафазным методом, В каждом варианте анализировали по 100-300 ана-телофаз.

В результате анализа интологических препаратов установлено

Частота клеток с хромосомными аберрациями в меристеме корней гибраца и исходных форм лука n (облучение сухих семян)

Сорт лука	Клетки с хромосом- ными аберрациями, %	Разница по сравне- нию с контролем Р,
Золотистий Харьковский острий Гибрид Золотистий х х Харьковский острий	15,9 12,2 14,4	99,9 99,8 98,8

ж Показатели контрольных вариантов вычтены.

достоверное по сравнению с контролем повышение частоти клеток с повреждениями хромосом (таблица). Сравнение характера структурных изменений хромосом при воздействии на семена и активно пролиферирующие ткани меристеми показало, что они существенно различаются. В первом случае преобладали аберрации хромосомного типа (рис. 2, см. вклейку); после облучения точек роста хромосоми приобретали свойство "клейкости", наблюдался также кариолизис и пикноз интерфазных ядер.

В проявлении цитогенетического действия радиоволи имеется значительное сходство с ионизирующей радиацией. Установлено [6], что в зародышах семян лука Allium сера более 90 % клеток находится на стадии у Поэтому, когда облучалась естественно синхронивированная в у популнция клеток (сухие семена), не было неожиданным появление аберраций именно хромосомного типа, так как их появление соответствовало состоянию хромосом в этот период митотического цикла. Несколько неожиданным было другое — увеличение структурных мутаций под действием данного вида излучения, отличающегося в энергетическом отношении от ионизирующей радиации. Возможно, появление хромосомных аберраций обусловлено опосредованным действием СВЧ поля и внсокой чувствительностью делящихся клеток лука исследуемых сортов. На сегодняшний день механизмы мутагенеза не выяснены.

При изучении пролиферативных процессов особый интерес представляет синтез ДНК. Для оценки этого показателя мы применили метод авторадиографии, который дает возможность судить о периодичности внутриклеточных процессов, наслюдать приуроченность процессов биосинтеза к определенным структурам клетки и получить представление о степени их активности.

В качестве радиоактивной метки использовали ${
m H}^3$ -тимидин, который, как известно, является единственным из четырех нуклеотидов,

участвующих в образовании полинуклеотидной структури ДНК. Использование этого специфического предшественника ДНК позволяет избирательно метить клетки в процессе их редупликации.

Объектами исследования были корешки проростков из семян лука. Облучению подвергали точки роста корешков, достигших длини 2-2,5 мм. Исследовали клетки корневой меристеми в течение первых часов и дней роста проростков. Проростки инкубировали в водном растворе изотопа (концентрация 2 мкКи/мл, удельная активность 41,9 Ки/ммоль). На радиоавтографах учитывали индекс метки — ИМ (процент меченых ядер) и интенсивность метки (количество зерен восста-

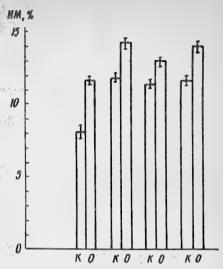


Рис. 3. Процент меченых ядер в клетках корневой меристемы проростков лука: 0, К - см. рис. 1

новленного серебра в эмульсии над ядром). Мечеными считали клетки с числом зерен над ядром не менее 6 - 8.

Ткани зародыша семян представляют собой в значительной степени синхронную популяцию клеток. Однако при прорастании семян происходит десинхронизация и в первый митоз вступает только часть клеток — около 40 %. Корневая меристема — гетерогенная обновляю щаяся ткань, клетки которой делятся асинхронно. В любой момент времени в популяции имеются клетки делящиеся и неделящиеся, находящиеся во всех фазах митотического цикла.

При кратковременном контакте проростков с меченим тритием — предпественником ДНК (импульсное мечение) — он включается только в те клетки, которые во время эксперимента находятся в *S*-периоде и в которых происходит редупликация ДНК. Отсутствие метки в некоторых интерфазных ядрах свидетельствует о том, что синтез ДНК или еще не начинался, или уже закончился. Учет меченых ядер позволяет судить о доли клеток популяции, в которых происходит синтез ДНК.

Частота встречаемости и изменение количества меченых Н³-тимидином ядер в популяции меристематических клеток на начальных этапах роста опитных и контрольных растений показана на рис. 3. Видно, что в течение всего эксперимента после инкубации с изотопом частота меченых ядер в опыте выше, чем в контроле (12-14 % против 12 % в необлученных клетках). Уже в период первой фиксации, через 2 ч после контакта с меченым предпественником, индекс метки постигает 42 %, что в 1.5 раза превышает таковой у необлученных объектов.

В связи с тем что увеличение поли меченых япер наблюпается в тканях опытных растений, пеление клеток которых ингибируется и происходит нарушение структуры хромосом, а подавление процессов клеточного размножения в первые сроки после облучения сменяется его восстановлением до значения контроля, повышенный синтез ДНК MOЖНО ИНТЕОПРЕТИРОВАТЬ КАК СИНТЕЗ РЕПАРАТИВНЫЙ. В РЕЗУЛЬТАТЕ КОторого негативные изменения носят обратимый жарактер, обусловленный происходящими в растениях процессами восстановления.

4. Левятков Н.Л. Об информационной сущности нетепловых и некоторых энергетических воздействий электромагнитных колебаний на живые обганизмы // Ж. техн. физики. — 1982. — № 1. — С.39-45. 2. Залюбовская Н.П. К оценке действия микроволи миллиметрового и

субмиллиметрового диапазонов на различные биологические объекти: Автореф. дис. ... канд. окол. наук. - Днепропетровск, 1970. — 30 с. 3. Иванов В.Б. Пролиферация клеток в растениях. — М.: Наука,

1987. — 215 с. 4. Шестопалова Н.Г. Цитофизиологические проявления эффекта тете—

Шестопалова Н.Г. Цитофизислогические продвления эффекта тетерозиса в норме и после облучения ЭМИ: Автореф. дис. ... д-ра бисл. наук. - Харьков, 1975. - 53 с.
 Эффекти нетеплового возрействия миллиметрового излучения на обслогические объекти / Под ред. Н.Д. Девяткова. - М.: Ин-т радиозлектрон. АН СССР, 1983. - 220 с.
 Втипоту А., Ancora G. The DNA content of nuclei in the embrionic root apices of dry seeds of Allium cepa and their radiation response // Caryologia. - 1968. - 21, N 3. - P. 261-269.
 Kremer F., Koschizizke C., Santol. The non-thermal effect of millimeter wave radiation on the putting of giant chromoso-

- millimeter wave radiation on the putting of giant chromosomes // 13th Eur. Microwave conf.: Microwave 83. - Nürnberg, 1983. - P. 859-864.
- 8. Idburdy R.P., Vanek P.F. Microwaves and the cell membrane. II. Temperature, plasma and oxygen mediate microwave-induced membrane permeability in the erythrocyte // Radiat. Res.

1985. - 102, N 2. - P. 190-205.

9. Baranski S., Szerski P. Microwave effects on mitosis in vivo and vitro // Genet. pol. - 1970. - 10, N 3-4. - P. 311-314.

10. Cieciura L., Hubner H. Wplyw promieniowahia microfalowego na

mitoze stozka wzrostowego korzonka bodu (vicia faba) // Med. pr. - 1971. - 22, N 2. - P. 211-220.

УДК 577:621.347.335.3.029.64

Л.Т.Малая, Т.Ю.Шеголева, Л.К.Бакова

ПРИМЕНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВОЙ ДИЗЛЕКТРОМЕТРИИ В БИОЛОТИИ И МЕДИЦИНЕ

Патологические изменения на уровне живого организма обусловлени строго детерминированными нарушениями молекулярных механизмов клетки. Исследование организации и функционирования молекулярных комплексов биологических систем является важнейшим направлением современной биологии, биофизики и теоретической медицины. Цикл работ, проводимый в НИИ терапии Министерства здравоохранения УССР совместно с ИРЭ АН УССР, посвящен разработке метода слежения за работой молекулярных систем живой клетки по данным о перераспределении в этих процессах связанной и свободной воды. Настоящая работа посвящена сопоставлению результатов исследования методом СВЧ диэлектрометрии механизма повреждения аденилациклазной системы (АЦС) эритроцитов вследствие развития сердечно-сосудистой патологии с клиническими признаками. Выделение в этом механизме определяющего звена для данного вида патологии проанализировано на диаграммах воздействия $\mathcal{E}^*(n)$ на длине волни 7,6 мм. На рис. 1 приведены диаграммы воздействия (а) и восстановлена по ним система связей всего комплекса АЦС (б) по данным СВЧ диалектрометрии /1/. Система по основным пунктам совпадает с известной из литературы, которая получена традиционными методами биожимии по анализу продуктов разрушения клетки после воздействия биологически активных веществ или их сочетаний. В отличие от традиционных методов СВЧ дизлектрометрия дает информацию в условиях неразрушающего контроля о состоянии клетки, что позволяет сделать ряд существенных дополнений в приведенную схему связей АЦС, например связь Са -канала с ∝-рецептором, пространственное разнесение центров связи гормонов и ПГЕ, на В-рецепторе и т.п. [2].

Патологические повреждения рассмотрени на Я -рецепторе по защитной функции ПТЕ, к связыванию гормона адреналина. Проведено прямое сопоставление клинических признаков с данным СВЧ диэлектрометрии по ответу клеточной системы на воздействия, изменяющие функцию з -рецептора. Кроме того, проведена цепь сопоставлений данных от моделей клеточного повреждения in vitro до модели развития ишемической болезни сердца (ИБС) ін vivo на крнсах биохимическими методами.

Методика эксперимента. Биохимические методы. В работе использован принцип, основанный на концепции грациентных систем, с целью установления общей закономерности изменений в физиологическом со-

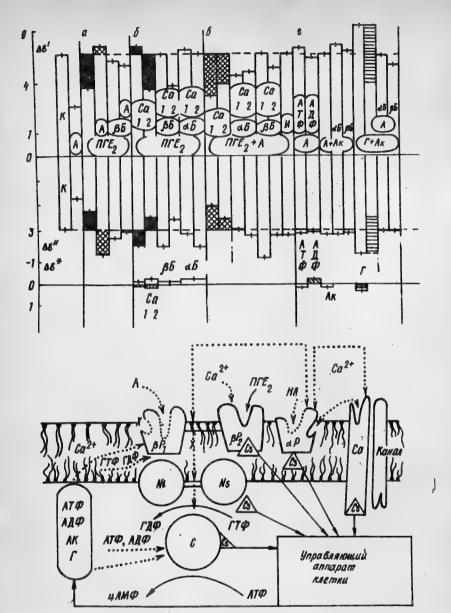


Рис. Л. Диаграмма (а) воздействий $\mathcal{E}^+(n)$ на компоненти АЦС эритроцитов и схема (б) связей АЦС: К - контроль; А - адреналин; $\alpha f, \beta f$ блокаторы αf - βf блокаторы αf - βf порядок; βf порядок; βf порядок; βf порядок; βf рецентор; βf порядок; βf порядок; βf рецентор; βf порядок; βf порядо

стоянии кардиомиоцитов и эритроцитов в условиях развивающегося ишемического повреждения. На модели ишемии миокарда в условиях перегрузки каршиомионитов кальнием, вызываемой по Fleckanstain и Roпа (4973 г.) экзогенным апреналином. у 470 крыс линии Вистар массой 160-220 г изучались особенности адренергической регулиции на разных уровнях организации. Использованы следующие показатели: сопержание адреналина, норадреналина, дофамина в гипоталамусе, нашточечниках, плазме крови, эритропитах, сердце, активность энергозависимого процесса обратного нейтронального мембранного транспорта меченого ЗН-НА при работе со слайсами тканей правого и левого предсердий с использованием специфических ингибиторов нейтро-номешилими йоколистичной и белковой компоненты мембран и показатели, характеризующие состояние внутриклеточного мета--адвиц йнаоноли терет эммочимические тести: мелоновый циальдегид в микросомальной фракции миокарда, содержание гидроперекисей в эритропитах и плазме, уровень спонтанной и инициированной хемилюминесценции и перекисной резиститности эритроцитов, активность глутатионредуктазы и глутатионпероксидазы, проницаемость для глюкози и активность глюкозо-6-фосфатдегидрогенази. Кроме того. об изменении целостности структур кардиомиоцитов и эритроцитов судили по показателям электронномикроскопических и морфометрических исследований, а также растровой сканирующей электронной микроско-THE STATE OF THE S

Результати и обсуждение. Клетку можно представить в виде белково-липидного матрикса, покрытого слоем воды. Сочетанием методов СВЧ диалектрометрии и рентгеноструктурного анализа показано 257.

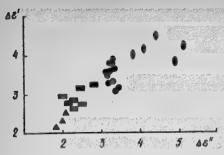


Рис. 2. Отличин в є', є" суспензии эритропитов при различных видах серпечно-сосудистой патологии: — норма: — - IE-II; — - MГ; — - ИБС

что организация гидратного окружения белковых макромолекул определяется его структурой, которая формируется во взаимодействии с растворителем. Изменения структуры сопровождаются изменениями гидратного окружения как на макромолекулярном, так и на тканевом уровнях. Следовательно, любое воздействие на меморанные компоненты должно сопровождаться изменением гидратного окружения взаимодействующих компонент.

9

На данном уровне интерпретации полученные значения комплексной дизлектрической проницаемости использованы как параметр, карактеризующий только факт изменения функционального состояния меморан. Изменения на молекулярном уровне, возникшие в результате

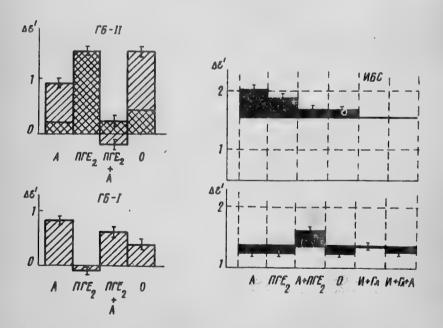


Рис.3. Отличия в клеточном ответе при различных видах сердечно-сосудистой патологии
38

развития сердечно-сосудистой патологии, послужили основой для создания лиагностического теста по диэлектрической проницаемости суспензий форменных элементов крови лейкопитов, эритропитов, тромбонитов в СВЧ пианазоне. На рис. 2 показаны отличия в е разных сталий гипертонической (ТБ) и ишемической болезней. Воздействием на модекудярние компоненты механизма, ответственного за проведение сигнала в клетку - в -ренептор, получали разные типы ответов клетки в условиях нормы и патологии (рис. 3). Они свидетельствуют о нарушении функции этого механизма рецепции первого звена всей цепи АЦС. Можно с уверенностью утверждать, что затронута конформация самого белка рецептора, так как не работает пара регуляторов ПТЕ и апреналина.

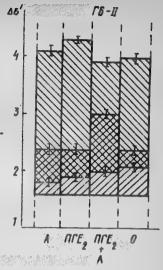


Рис. 4. Индивидуальность клеточного ответа в условиях гипертонической болезни II стадии

На рис. 4 показана индивидуальность болезни <u>П</u> стадии клеточного ответа при воздействии на стадии. Такие индивидуальные оценки можно получить для всех видов патологии и подбора лекарственных воздействий. Эффекты отличаются амилитудой для выделенных видов патологии и по знаку для разных видов патологии при воздействии на один из регулярных центров рецептора — гормональный центр связывания <u>ШЕ</u>2. Суммарный эффект защиты <u>ШЕ</u>2 от воздействия адреналина значительно более вариабелен. Как показывают диаграммы широкого спектра воздействия, это вызвано связью с другими звеньями цепи.

Биохимическими тестами показано, что в условиях моделирования ишемического повреждения // //// развиваются процессы чрезмерной активации адренергических механизмов, что выражается в повышении содержания А и НА, небольшом снижении ДОФ, активации процесса биосинтеза катехоламинов, ингибировании ключевого фермента метаболизма катехоламинов—моноаминоксидази. Такие же нарушения зафиксирования в кардиомиоцитах и эритроцитах // ///// Эти данные свидетель—ствуют о том, что в основе механизма повреждения клетки лежит чрезмерное моноаминергическое обеспечение клетки, которое видно на рис.

2-4 по данным СВЧ дивлектрометрии. В отличие от биохимических методов СВЧ диалектрометрия позволяет локализовать места повреждения системи управления клетки по анализу полных диаграми воздействия,

Итак, апробация метода СВЧ диалектрометрии в сопоставлении с SKCHEDINGHTAMK IN VIVO K IN VITTO C HOMMEHEHMEM GROXIMMYECKUX MEтодов показала хорошую корреляцию данных, а также возможность получения более обширной информации, высокую смысловую точность измерений. С одной стороны, стала очевидной индивидуальность реакции организма, что чрезвичайно важно в практической медицине: другой - возможность проведения каждого эксперимента с эритропитами одной особи или индивидуума за короткое время (время изменения • одной пробы составляет ~5 мин) полностью исключает ряд существенных погрешностей за счет неидентичности клеток, и основная погрешность эксперимента сводится к погрешности СВЧ диэлектрометра. Информативность метода обусловлена его чувствительностью к изменению компонент системы, определяющих структуру и функцию мембранных комплексов. Работа с нативными клетками позволяет сделать оценки обратимости повреждений для данного индивидуума и в случае обратимости направлено полобрать факторы, восстанавливающие систему регуляции. Имеется также прямая возможность слежения и прогноэирования клинических проявлений в течение развития сердечно-сосудистой патологии.

1. Щеголева Т.Ю. СВЧ-диалектрометрия биополимеров и клеток: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. — М., 1988. — 40 с. 2. Малая Л.Т., Щеголева Т.Ю., Бахова Л.К. Исследование методом

Малая Л.Т., Петолева Т.Ю., Бахова Л.К. Исследование методом СВЧ-диэлектрометрии параметров нативного аденилетциклазного комплекса при молуляции его активности // Биофизика. — 1988. — 33. вып. 4. — С. 629-633.
 Петолева Т.Ю. Измерения электрических параметров тонких образцов полидисперсных, жидких и твердых диэлектриков с большим потлошением в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электрон. — 1981. — 26. М 1. — С. 2328-2333.
 Петолева Т.Ю., Бахова Л.К. Гидратация — параметр, отвечающий на структурно—бункциональные изменения мембран // Биофизика. — 1986. — 31. вып. 2. — С. 358-359.
 Петолева Т.Ю. Гидратное окружение макромолекул биополимеров по данным СВЧ-диэлектрометрии // Там же. — 1984. — 29., вып. 6. — С. 935-939.

YIK 547.744

А.А.Сериков. Л.Н.Христофоров

об Эффектах возлействия MUKPOBOJIHOBOTO SJIEKTPOMATHUTHOTO VISJEYTEHVI HA EMOMOJIEKYJIRPHHE CHCTEMH

Изучение воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ диапазона на биологические объекти к настоящему времени оформировалось в одну из интереснейших областей электромагнитобиологии. Сложившейся здесь ситуации трудно дать однозначную оценку. Действительно, накопленный в последние десятилетия богатый экспериментальный материал (см., например. /17 и приведенную там библиографию) свипетельствует о существенных эффектах облучения низкоинтенсивными СВЧ полями биообъектов самого различного уровня организации; установлени и некоторые общие черти такого воздействия. Появились и успешно внедолются в клинику основанные на нем методы лечения различных патологий /27. В то же время остается неясным, как в принципе объяснить заметное влияние полей, не обеспечивающих жотя он местного нагрева тканей более чем на лесятую долю градуса. Неясно также, на каком уровне обеспечиваются рецепция ЭМИ и первичные "чисто физические" акты его воздействия. Между тем проблема может оказаться гораздо шире, чем то ликтуется ее прикладными аспектами. Подтверждаемая все новыми сообщениями универсальность воздействия слабого микроволнового излучения на биосистемы заставляет задуматься над тем, не является ли электромагнитный канал взаимодействия в соответствующем диапазоне частот фундаментальным, внутренне присущим всему живому средством передачи информации и управления.

Большинство работ, ставящих целью теоретическое осмноление эффектов биологического пействия слабого ЭМИ, в том числе СВЧ биоэффектов, носят, как правило, феноменологический либо полуфеноменологический жарактер, используя весьма общие кооперативные, точнее говоря, синергетические модели биосистем. Многие автори апеллируют, в частности, к известной модели фредиха /37. Однако при безусловной полезности синергетических подходов к данной проблеме сами по себе они не могут прояснить природу конкретных носителей "необичных" свойств биосистем, как и дать ответ на вопрос о первичных механизмах биологического действия ЭМИ. Для этих пелей требуется, по-видимому, более детальное моделирование, учитывающее количественные характеристики рассматриваемых эффектов. Напомним в этой связи, что используемые в самых различных экспериментах по

воздействию микроволи на биообъекти мощности излучения имеют порядок ~ 1 мВт/см 2 (в ряде последних сообщений фигурируют и существенно более низкие значения, но ми пока будем ориентироваться лишь на многократно проверенные данные). Далее, фиксируемые в целом ряде опитов эффекти жарактеризуются острорезонансной частотной зависимостью с относительной шириной спектра действия $< 10^{-3}$ ной зависимостью с относительной шириной спектра действия $< 10^{-3}$ а иногда и $\sim 10^{-5}$. Существенно также, что описываемые эксперименты проводились, как правило, при физиологических температурах, определяющих соответствующий уровень термодинамических флуктуаций в исследуемых системях.

Исходя из сказанного сосредоточим внимание именно на рассмотрении первичных механизмов воздействия СВЧ излучения на биосистемы. При этом нас будут интересовать процессы, протекающие в биологических макромолекулах (биополимерах), непосредственно взаимопействующих с ЭМИ. Биополимеры представляют собой нижайший специфически биологический уровень организации материи: макромолекулы нуклеиновых кислот ответственны за хранение и передачу генетической информации, высокоэффективный катализ биохимических реакций. составляющих основу жизнедеятельности организмов, обеспечивается макромолекулами ферментов, биополимеры белков формируют также каналы зарядового транспорта, пронизывающие клеточные мемораны. Характерной особенностью биополимеров является присущее всем им свойство молекулярной, в частности конформационной, изомерии. В соответствии с современными представлениями конформация биомолекул играет важнейшую родь в их функционировании. Так, процессы репликации, синтез белков сопровождаются нереходом участков двойной спирали ДНК из "физиологически нормальной" В- в А-конформацию. Определенным конформациям отвечают и биохимически активные состояния ферментов. Переходы между различными конформационными состояниями биомолекул, разделенными барьерами, обычно значительными по сравнению с тепловыми энергиями кТ. происходят, как правило, с использованием энергии гидролиза АТФ - универсального источника энергии в биосистемах. Подчеркнем также, что все сказанное относится и к отдельным фрагментам биологических макромолекул — участкам спирали ЛНК, активным ецентрам ферментов и т.п.

В свете отмеченного одним из возможных первичных механизмов воздействия ЭМИ на биосистемы представляется индуцирование, с его помощью переходов между различными изомерическими состояниями биомолекул (применительно к ферментам эта мысль высказывалась, в частности, Фрёлихом). Поглощаемая энергия излучения в соответствии с таким представлением идет на преодоление (полное или частичное) 42

барьера, разделищего конформери. Необходимим условием осуществления данного процесса является, разумеется, электрическая активность соответствующих степеней свободы биополимеров. Определенным основанием для предлагаемой трактовки первичных механизмов применительно к экспериментам в микроволновом диапазоне служит информация о спектрах биополимеров. Так, для частот упругих деформаций глобулярных белков известна оценка [4] о 10¹⁰ с⁻¹. Проведенные, исходя из структурных данных, расчеты частот колебаний нуклюозиров (мес 200м), входящих в состав двухтижевих ДНК, при различных конформациях макромолекул приводят к величинам [5] о 200 го 10¹² с⁻¹, что согласуется также с данными спектроскопии КР.

Простейшая молель, иллострирующая переключение с номошью ЗМИ конформационных состояний молекули, соответствует залаче о цвижении частиць в потенциальной яме //(х) с двумя минимумами, разлеленными барьером. Переменная сила $f(t) = \theta E(t)$ (ℓ - заряд частиин: E(t) напряженность электрической компоненти поля излучения) винущает колебания частипи, первоначально локализованной по одну из сторон барьера, с амплитудой, приближающейся к координате максимума. Так что теплевые флуктувнии энергии частини отановятся постаточными для непосредственного перехода ее через барьер (за время, в течение которого пействует поле). Применимость классического (неквантового) описания колебаний частицы в рассматриваемом частотном диапазоне обеспечивается малостыю фактора Му/К/ (пля частот и ~ 10 м с 1 это величина порядка 0.01). Однако облывая по сравнению с тепловыми энергиями высота барьера $(\in /\!\!/\!\!/\!\!>)$ повводяет избежать непосредственного введения в рассмотрение случайных сил. порождающих тепловне флуктуации движения (не слишком существенные для высоковнертетических колебаний), ограничив учет многочастичных аспектов задачи включением силы трения. Таким образом, приходим к уравнению движения частицы

$$m(\ddot{x} + 2A\dot{x}) + dU(x)/dx = F(t), \tag{1}$$

где // масса; / - коэффициент затухания, характеризующий потери энергии на трение; точки обозначают дифференцирование по времени.

Как известно, наиболее эффективное возбуждение колебаний осщиллятора с помощью внешней силы происходит в условиях резонанса. Эффект резонанса сохраняется, вообще говоря, и при ангармоничес-ком потенциале (наличие барьера между ямами приводит к необходимости учета отклонений от гармонического приближения, по крайней мере, для колебаний достаточно большой амплитуды). В то же время само понятие резонансной силы (сигнала) не сводится в данном случае

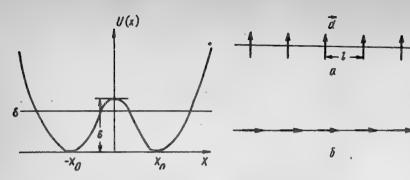


Рис. Т. Представление симметричного пвухъямного потенциала

Рис. 2. Варианты одномерной це-

к совпадению частот, а требует более общей трактовки. Ниже условимон понимать под резонансной (точнее, квазирезонансной) силу. вызывающую вынужденное движение частицы, совпадающее с ее свобопными колебаниями в рассматриваемой потенциальной яме. Применительно к нашему случаю свободные колебания описываются уравнением ті + +dU(x)/dx = 0. Подставляя частное решение этого уравнения $x=x_{x}(t)$ (& = энергия колебаний) в исходное уравнение (1), приходим к выражению $f_{\mathcal{E}}(t)$ = $2am\dot{x}_{\mathcal{E}}(t)$ для внешней силы, вынуждающей резонансное ангармоническое движение частицы с амплитудой, соответствующей заданной величине ε . Фурье-компонента $\tilde{F}_{\varepsilon}(\omega) = 2$ лт $\omega \, \tilde{i}_{\varepsilon}(\omega)$ определяет при этом спектральный состав резонансного сигнала; в частном случае гармонического сигнала она имеет вид θ -функции в окрестности собственной частоты осщиллятора. Для симметричного двухъямного потенциала $U(x)=e(1-x^2/x^2)^2$ (рис. 1) собственное движение частицы в левой яме с энергией 🐫 = 6-0 описывается функиней $x \in (t) = \sqrt{2} x_0 ch^{-1} (Ne/m t/x_0)$. Спектральный состав резонансного сигнала определнется при этом виражением $F_e(\omega) = -\lambda m^{3/2} (2e)^{-1/2} x$ 1×2 ach $(1 \times \sqrt{m/e} a/l)$ и имеет (по абсолютной величине) максимум при $a \approx 1$ $\frac{\sqrt{2}}{2K}\sqrt{e/m}$ (что существенно ниже частоты колебаний $\omega = \frac{2}{K_0}\sqrt{2e/m}$ у дна ямы). Мы не останавливаемся здесь на подробном анализе спектра резонансного сигнала, особенностей переходного режима, за время которого (1 - 7) частица "набирает" необходимую энергию & п других подобных вопросах. Приведенные соображения нужны для выбора конкретного подхода к исследованию эффектов резонанса в нелинейных колебаниях. В дальнейшем нас будут в основном интересовать оценки энергетических эффектов, достижимых при возбуждении молекулярных осцилляторов, анализ которых, как правило, можно ограничить рамками гармонического приближения.

Амплитуда свободных колебаний гармонического осциллятора с потенциальной энергией $U(N) = m\omega_0^2 N^2/2$, как известно, может быть выражена через его энергию в виде $X_0 = \sqrt{2\varepsilon/m} \, \omega_0^2$. Амплитуда вынужденных колебаний данного осциллятора при действии на него резонансной силы $f(t) = \varepsilon E_c \cos \omega_0 t$ представима как

$$I_0 = e f_0 / 2 \text{ amw}_0. \tag{2}$$

Приравнивая оба эти виражения для κ_0 , представляем амилитуду напряженности электрического поля ξ_0 как функцию энергии винумденных колебаний: $\xi_0 = 2\sqrt{2m\varepsilon} \ \omega_0 \ A/\varepsilon$. Это виражение можно также переписать в виде $\xi_0 = 2\xi_0 \ g$. Где $\xi_0 = \sqrt{2m\varepsilon} \ \omega_0 \ A/\varepsilon$ — напряженность постоянного поля, необходимая для перемещения частицы в точку κ_0 или, что то же самое, для сообщения ей энергии ε ; $g = A/v_0 = 2\pi A/\omega_0$ — логарифмический декремент затухания (обратное значение добротности осциллятора).

Подставляя в полученные выражения характерные для локальных колебаний биомолекул в микроволновом диапазоне значения

$$w_0 = 10^{12} c^{-1}, \quad m = 200 \, m_p; \quad e = e^{-1}$$
 (3)

и полаган ε = 10k/ (что достаточно много по сравнению с энергией тепловых колебаний и в то же время сравнимо с энергией гидролиза АТФ, обеспечивающей конформационные переходы при функционировании биомолекул), получаем, в частности, значение напряженности постоянного поля $\xi \approx 5.40^6$ В/см, близкое к величинам внутримолекулярных полей. При этом для достижения энергии ε с помощью резонаноного переменного поля с амплитудой напряженности $\xi \sim 1$ В/см, что отвечает упомянутой выше мощности источника ЭМИ \sim Т мВт/см², требуется значение $g \sim 3.10^{-7}$. Соответствующая добротность не характерна даже для спектральных линий атомов. Таким образом, взаимодействие излучения с отдельно взятыми локальными колебаниями биомолекул не может служить достаточно эффективным первичным механизмом, обеспечивающим экспериментально наблюдаемое биологическое действие СВЧ полей.

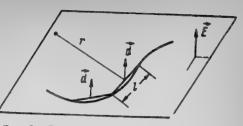
Поиски более эффективных механизмов взаимодействия биологических молекул с ЭМИ должны основываться на моделях, явным образом учитывающих их макромолекулярную природу. Ниже рассмотрены некоторые такие модели.

4. Антенний эффект. Как известно, функционирование ряда биологических макромолекул, в частности ферментов, во многом определяется процессами, протекающими в их активных центрах, окруженных биополимерными цепочками, часто свернутыми в глобулы. Исходя из такого представления о структуре биомолекули, резонно предположить, что взаимолействие с нолем излучения приводит к возбуждению дипольно-активных колебаний мономеров, формирующих указанную цепочку, а те, в свою очередь, индуцируют колебания в активном центре, способные привести к переходу его в другое конформационное состояние. Подобный эффект антенны реализуется, как известно, в фотосинтетических системах (фотосинтетическая единица включает в себя светособирающую антенну и связанный с ней фотореакционный центр).

В качестве простейшей модели для иллострации антенного эффекта рассмотрим одномерную цепочку мономеров, варианты которой изображены на рис. 2. Предположим, что характеризуемые координатами N_n локальные дипольно-активные колебания каждого из мономеров имеют одинаковую собственную частоту \mathcal{D} , затухание N и связаны взаимощействием через электрическое поле дипольных моментов $M_n = N_n$ (в рассматриваемом случае одномерной структуры можно ограничиться учетом взаимодействия лишь соседних диполей). Пусть, далее, определенный (N=0) мономер аналогичным образом взаимодействует с выделенным осциллятором (принишем ему координату M и параметры $\widehat{\mathcal{D}}$, $\widehat{\mathcal{A}}$), характеризующим колебания в активном центре макромолекулы. Уравшения движения для координат M при действии внешнего однородного монохроматического поля приближенно представимы в виде

Характеризующий взаимодействие диполей параметр $\bar{\omega}^2$ для структури, представленной на рис. 2,а, определяется выражением $\bar{\omega}^2 = e^2/m l^3$, где l — расстояние между центрами соседних мономеров; аналогично задается и параметр $\bar{\omega}^2$. Максимальная амплитуда колебаний осцилитора l, отвечающая случаю резонанса $\bar{\omega}^2 = \bar{\Omega}^2 + 2\bar{\omega}^2$, оказывается равной l = el, $\bar{\omega}^2/4m\lambda\bar{\mathcal{R}}^2 = l_{l}\bar{\omega}^2/2\hbar\bar{\mathcal{R}}$, где l — значение амплитуды колебаний при непосредственном действии излучения на осцилитор l (с точностью до обозначений величина l определяется формулой (2)). Соответственно для достижения той же амплитуды (и знергии) колебаний l по механизму антенны требуется резонансное поже с амплитудой l = l = l = l = l — амплитуда поля, непосредственно действующего на осциллятор; l — логарифмический декремент затухания колебания l . Согласно проведенному выше рассмотрению, можно также записать l = l

При значениях (3) и / порядка нескольких ангстрем оценка величин о о приводит к значениям в области сотен гигагерц, т.е. также принадлежит микроволновому диапазону. К тому же результату приводит и подстановка значений ресоле, мето, карактерных для водородных связей.



тату приводит и подстановка Рис.3. Представление оиомолекулярзначений *e-0.70*, *m-m*, карак- ной цепочки в виде длинной нити

цепочки которых также типичны для биомолекулярных структур. Таким образом, антенний механизм в принципе можно использовать для рассмотрения взаимодействия биомолекул с СВЧ полями. Полагая для простоты $\hat{\mathcal{L}} \approx \tilde{\mathcal{L}}$ и используя полученное выше значение $\hat{\mathcal{L}} = 5$ х х 10^6 В/см, находим, что требуемому значению $\hat{\mathcal{L}} \sim 1$ В/см отвечает декремент затухания $\hat{\mathcal{L}} \sim 3 \cdot 10^{-3}$. Эту оценку можно улучшить, рассматривая взаимодействие выделенного колебания с двухмерной либо трехмерной антенной дипольно-активных общилляторов. С учетом особенностей диполь-дипольного взаимодействия оба этих типа антенны позволяют уменьшить требуемые значения $\hat{\mathcal{L}}$ примерно на порядок по сравнению с одномерным случаем (конкретные значения размерного фактора зависит от типа упаковки мономеров в антенне).

где L — расстояние, отмеренное вдоль нити. Таким образом, пережод от линейной формы молекулы ($R^2\sim L^2$) и клубку ($R^2/L^2\sim D$) определяется отношением LL^2/d .

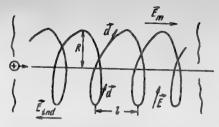
Пусть теперь под действием ЭМИ в мономерах молекулярной цепи возбуждаются дипольно-активные колебания, перпендикулярные плоскости упаковки. Отталкивание соседних диполей приведет при этом к

47

увеличению жесткости нити на величину $\Delta a = 3e^2 x_0^2/4l^2$, где x_0 определяется формулой (2). Из условия $\Delta a \ge LkT$ получаем значение амплитуды напряженности $\xi_0 > \frac{2m\omega_0^2 Q}{\pi e^2} \sqrt{\frac{NkT^3}{3}(N-\frac{L}{4})}$ при которой указанное изменение жесткости существенно сказывается на форме макромолекулы. Подставляя численные значения (3) и t = 4 Å, $E_0 = 1$ В/см, t = 100, определяем необходимое для эффекта значение декремента затужания $t = 3.10^{-6}$.

З. Влияние ЭМИ на зарядовый транспорт. Известно, что эффективность работи биологических транспортных систем во многом обеспечивается именно полимерными свойствами биомолекул. Рассмотрим простейную молель трансмеморанного ионного канала, предполагая, что стенки его образованы спиральным биополимером (белком), а цвижение ионов происходит под действием мембранной разности потенциалов, определяющей напряженность (постоянного) поля 🛵 (рис. 4). Разумеется, реальный ионный канал и движение ионов в нем намного сложнее. Предложенная модель позволяет, однако, оценить возможности управления транспортом заряда через мембрану с помощью слабого микроволнового ЭМИ при весьма значительных напряженностях Е. Конкретно выясним условия, при которых индушированные излучением дипольно-активные осщилляции в звеньях биополимерной цепи порождают поле E_{ind} , способное "закрыть" канал (здесь уместна аналогия между макромолекулой белка и управляющей сеткой в триоде). Скема расчета эффекта ясна из рис.5 и сводится к сложению полей, действующих на переносимый ион со стороны (характеризующихся разными подвижностями) зарядовых компонент индупированных диполей. Усреднение по периоду колебаний приводит к отличной от нуля постоянной составляющей напряженности $\langle \ell_{ind} \rangle$, вклад в которую дают все диполи белковой спирали. Опустив несколько громоздкие промежуточные выражения, выпишем здесь результат расчета максимального (по длине канала) значения $\langle f_{ind} \rangle_{max} = \frac{Je_{R}^{2}}{2R^{2}}$ (численные коэффициенты, впрочем, несколько варьируются в зависимости от ориентации относительно оси канала напряженности 🗲 электрической компоненты ЭМИ), где R - радиус канала, а амплитуда колебаний 🚜 определнется формулой (2). Приравнивая значения < Епа > мак и Еп получаем выраже-HME $\xi = \sqrt{2\xi_0} / 3e^3 m \omega_0^2 R^2 q / \pi$ для амплитуды напряженности СВЧ поля, обеспечивающего "запирание" канала. При использовании значений (3), полагая также $\Lambda = 3 \text{ Å}$, $\xi_{m} = 10^{5} \text{ B/cm}$ (типичная напряженность поля в биологических мембранах), находим необходимое для эффекта значение декремента затухания 4 ~ 3-40-5.

Поиски эффективных механизмов взаимодействия биомолекул с микроволновым ЭМИ, видимо, могут быть продолжены и на других моделях. 48



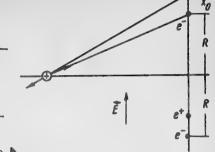


Рис. 4. Простейшая модель трансмеморанного ионного канала

Рис. 5. Схема расчета порожденного поля *End*

Представляется, однако, маловероятным, что при этом удастся сколько-нибудь значительно понизить необходимые для эффекта добротности молекулярных осцилляторов по сравнению с найденными выше значениями ≥ 10³ − 10⁴. Но именно такие добротности жарактерны для резонансов экспериментально наблюдаемых спектров действия СВЧ полей на биообъекты. Это относится, в частности, к экспериментам на дрожжах 万7. В едва ли не единственном сообщении 267 об опытах на молекулярном объекте (Нв) названа величина, близкая к 10⁵. Столь слабая релаксация колебаний при физиологических температурах в области частот, соответствующей достаточно сильному поглощению среды, требует тем не менее специального объяснения. Выскажем здесь определенные соображения, наиболее уместные, по-видимому, применительно к колебаниям в активных центрах глобулярных белков.

Полученные в последние годы различными методами данные по динамике биомолекул свидетельствуют о растущей от центра глобулы к периферии подвижности молекулярных групп. Исходи из этого факта можно предположить, что периферийные субъединицы с их расторможенными поступательными степенями свободы (о чем и свидетельствуют высокие подвижности) испытывают непосредственное влияние растворителя, в частности воды, обладающего достаточно высокой плотностью состояний в интересующей нас области частот (обеспечивающей интенсивное поглощение), поэтому колебания, индуцированные в них СВЧ полями, должны характеризоваться значительным затуханием. Напротив, затухание осцилляций в плотноупакованных (низкие подвижности) молекулярных группах, близких к центру глобулы, обязано лишь их взаимодействию с себе подобным окружением, не обладающим высокой плотностью состояний в микроволновом диапазоне. Следствием такой "архитектури" биомолекулярной глобулы должно явиться установление в

ней иераржим возрастающих от периферии к центру добротностей СВЧ колебаний. По отношению к центральным участкам можно по существу говорить липь об опосредованном затухании осцилляций, слабую эффективность которого иллюстрирует простейший пример.

Рассмотрим систему двух слабо связанных резонансных по отношению друг и другу осщилляторов, один из которых характеризуется запанным затуханием. Wrpaя по отношению ко второму роль термостата. Уравнения пвижения такой системы имеют вид

Правне части могут включать произвольные внешние воздействия; в секулярном же уравнении учет взаимодействия $\omega \ll Q$ д приводит к отличной от нуля мнимой добавки к частоте осциллятора х, равной $Im \Delta \omega = 2\tilde{\lambda} = \bar{\omega}^4 / 4\Omega^2 A_1$. В силу указанного неравенства "индуцированное" затукание, однако, мало: $\tilde{\lambda}_2/\Lambda_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{\omega}^2}{2 \lambda_1 \mathcal{R}} \right) \ll 1$.

В заключение отметим также, что при карактерных для экспериментов по СВЧ биоэффекту длительных временах экспозиции (минути и даже часы) энергия, которую необходимо передать от ЭМИ на молекулярные колебания для преодоления барьера между различными конформационными состояниями, реально может оказаться значительно ниже, чем его высота (принятая нами ~ 10 кТ), что в принципе позволило он ослабить требования к побротности исследуемых резо-

Настоящая работа выполнена по программе ВК "Отклик".

Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. — 284 м.
 Физические основн микроволновой (биорезонансной) коррекции физиологического состояния организма человека / Е.А. Андреев, М.У.Белий, В.А.Куценок и др. // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М., 1985. — С. 58-85.
 Fröhlich H. Bose-condensation of strongly excited longitudinal electric modes // Phys. Lett.A. — 1968. — 26, N. 6. — Р. 402-403.

electric modes // Phys. Lett.A. - 1968. - 26,N 6. - P.402-403.

4. Чернавский Д.С., Хургин Ю.И., Шноль С.Э. Об упругих леформациях белка-фермента // Молекуляр. биология. - 1967. - 1. № 3. С. 419-424.

5. Волков С.Н., Косевич А.М. О конформационных колебаниях ДНК //
Там же. - 1987. - 21, № 3. - С. 797-806.

6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. - М.: Наука,
1964. - 567 с.
Grundler W., Keilmann F. Sharp resonances in yeast growth prove nonthermal sensitivity to microwaves // Phys. Rev. Lett. 1983. - 51, N 13. - P. 1214-1216.

8. Диленко Н.П., Зеленцов В.И., Ча В.А. О конформационных изменениях биомолекул при взаимодействии с электромагнитным излучением // Эффекты нетецлового воздействия миллиметрового излучения на окологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1983. — С. 63—77. VIK 624.3/17

К.В.Ворсуль, Т.А.Смирнова, Н.Т.Черпак

STIP - CHEKTPOMETP JUANASOHA JULUH BOJIH 4-1.5 MM

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) является одним из наиболее эффективных методов исследования вещества. Информативность метода существенно возрастает с укорочением длины водны. В настоящее время метод ЭПР широко применяется во многих областях физики, жимии, биологии и медицины.

При изучении мазерных характеристик активных криоталлов обычно использовались резонаторные системы /1/. Однако для исследования спектров ЭПР в миллиметровом пианазоне (ММД) удобно использовать режим бегущей волны (БВ) при взаимодействии СВЧ поля с парамагнитным кристаллом [2]. Это обусловлено рядом причин /37:

с укорочением длины волны 3 сигнала при прочих равных условиях возрастает чувствительность спектрометра как J^{-k} ,где k > 1:

появляется возможность измерений в широком частотном шиапазоне, при этом не требуется настраивать собственную частоту и коэффициент связи резонатора с линией, что важно при работе с низкими температурами:

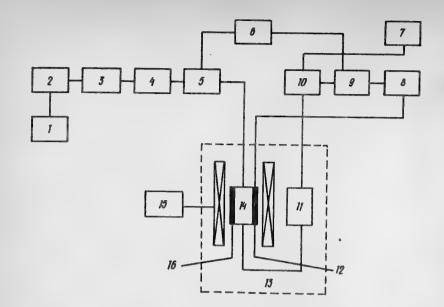
волноводная секция конструктивно проще, чем резонатор; также проще анализ результатов.

На практике режим БВ использовался для исследования мазерных карактеристик ряда кристаллов в ММД: андалувита с ионами $\sqrt{3}$, 47, вольфромата магния с ионами Cr^{5+} /57 и пр.

В данной работе представлен спектрометр ММД, предназначенный для исследования ЭПР опектров кристаллов в широком диапазоне частот () = 4-1,5 мм) в магнитных полях до 30к3, в интервале темпеparyp T = 1.7-10 K.

В спектрометре (рис. 1) источником сигнала 2 олужит лампа обратной волны (/= 4-3 мм) или генератор дифракционного излучения (4 = 2,6-1,5 мм), обеспечивающий вноокую стабильность по частоте $(\sim 10^{-5})$ и уровню мощности излучения (~ 10 %) [6]. Достаточно высокая чувствительность спектрометра достигалась применением синкронного детектора 9 с модулящией сигнала по мощности широкополосным р-/-и. модулятором и использованием в качестве приемника СВЧ излучения оклажденного кристалла п-Глзв , расположенного в крисстате 13. Оценка чувствительности дает значение 40 14 спин/3.

Магнитное поле напряженностью до 30 к3 ооздавалось оверхпроводящим соленоидом с ферромагнитным экраном /7/. Однородность магнитного поля $\Delta H/H$ при H=25 кЗ на длине 40 мм не куже $2\cdot 10^{-4}$



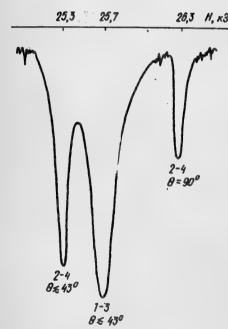


Рис. 2. Запись линий ЭПР в андалузите

263 И. к. Рис. 1. Блок-схема спектрометра: 1 - блок питания; 2 - аттенкатор; 4 — волномер; 6 — звуковой генератор; 7 — ос-циллограф; 8 — самописец; 9 синхронный детектор; 10 — уз-кополосный усилитель; 11 — детектор; 13 — криостат; 14 — волноводная секция; 75 олок питания СП магнита: 46 датчик температуры

> (характерный размер исследуемых образцов $3x0.5x0.8 \text{ мм}^3$). Значение напряженности магнитного поля определялось с помощью датчика Холла 12 с погрешностью не более 2 % (при H = 20 kg

Спектрометр использовался для измерения значения парамагнитного поглощения и ширины линии ЭПР в андалузите с ионами Fe3t, а такле, будучи дополненным схемой подачи мощ-

ности накачки. - иля исследования инверсионных характеристик этого кристалла /8. 97. Измерение мазерных жарактеристик вешества волноводным методом проводилось в секции, представляющей прямоугольный волновод пониженного сечения 0.9 ж 0.5 мм². Наличие пвух согласующих лейкосацфировых клиньев исключало влияние регенеративного эффекта на точность измерений и позволило обеспечить КСВ не xvxe 4.2.

На рис. 2 приведена запись линий парамагнитного поглошения. соответствующих междублетным переходам 4-3, 2-4 в спин-системе ионов Fe^{3+} в андалувите на частоте 200 ITu при T=4.2 К.

1. Hyn 4. Texhuka MP-chektpockomum. - M.: Mup, 1970. - 100 c. 2. Slegman A.E. Quantum Electronics / A. Simp. - New York : Colum-

2. Siegman A.E. Quantum Electronics / A.Simp. - New York: Columbia Univ. Press, 1960. - P. 597.

3. Мишенко В.В., Черпак Н.Т. Измерение магнитной воспримчивости кристаллов в волноводе: Тез. докл. IV Всесовз. конф. (Новосиойрск, 1979). - Новосиойрск: СНИМ, 1979. - С. 176-178.

4. Копилов А.А., Мышенко В.В., Песковацкий С.А., Шульга В.М. Мазериме жарактеристики андалузита с трежвалентным железом на частотах 75-115 ITц // Укр. физ. журн. - 1985. - 30, № 6. -

частотах 75-115 ГТц // Укр. физ. журн. - 1980. - 50, ж б. С. 856-858.

5. Черпак Н.Т. Квантовые усилители миллиметрового плапазона длин волн // Изв. вузов. Радиофизика. - 1984. - 27, ж 7.-С.815-851.

6. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. - Харьков: Вища шк., 1976. - 232 с.

7. Smirnova Т.А., Stetsenko A.I., Shamfrov Ya.L: A superconducting magnet with shield for fields up to 30 koe // Cryogenics. - 1977. - 17, N4. - Р. 244-246.

8. Ворсуль К.В., Смирнова Т.А., Черпак Н.Т.Андалузит как активное вещество для квантовых усилителей бегущей волны в 3-мм диапазоне//Изв. вузов. Радиофизика. - 1986. - 29, 17. - С. 838-844.

9. Ворсуль К.В., Смирнова Т.А., Черпак Н.Т. Трехуровневая схема в андалузите для 3-мм диапазона // Письма в ТТФ. - 1987. - 13, № 2. - С. 78-80.

УЛК 57.043

В.Д.Бобрышев, А.С.Снурников, В.Б.Швед ЛИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗОТРЕВ КРИОКОНСЕРВИРОВАННЫХ КЛЕТОЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ B CAHTUMETPOBOM M MUJUJUMETPOBOM JUMINASOHAX

Дивлектрический разогрев применительно к задачам криобиологии имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционным способом размораживания, основанном на передаче энергии от внешнего теплоносителя. Он позволяет реализовать объемное тепловиделение и широкий дианазон скоростей изменения температуры. При этом управление режимом разогрева осуществляется на уровне регулирования внкодной мощности СВЧ генератора, что обеспечивает простоту и безннерционность процесса. Тем не менее в практике криобиологии имэлектрический разогрев до сих пор широко не применяется, что обусловливается в первую очередь жесткими требованиями к однородности и изотропности объекта, при невыполнении которых возможны значительные локальные перегревы.

В настоящей работе на основе математической модели, описыватищей процесс диэлектрического разогрева в системе, состоящей из ледной матрицы и жижих оферических включений переохлажденной пресной и морской воды, исследована зависимость температуры ло-кального перегрева от частоты электромагнитного поля. Использованная в качестве модели двужфазная гетерогенная система по теплофизическим и электрофизическим характеристикам адекватна реальной системе — замороженной клеточной суспензии. Процесс диэлектрического разогрева принятой модели описывается следующей системой уравнений [7]:

Now yearhermy [A]:
$$A\theta = \frac{R^2 E_0^2 \omega e_2^{\nu} E_0}{2A_2} - \left[A_1 \cos^2 \Omega + B_1 + D_1 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \right],$$

$$A1 = \frac{A_2 \left(k_1 + k_3 \right)}{2A_1 + 3A_2},$$

$$A2 = \frac{\left(A_2 + 2A_1 \right) k_3 + 2k_1 \left(A_1 - 2A_2 \right)}{2A_1 + 3A_2}$$

$$B1 = \frac{1}{3} \left[\frac{A_2 E_1^q}{A_1 E_2^{\nu}} k_2 + A_2 - \frac{A_2 C_1}{A_1 C_2} \right],$$

$$L_1 = \frac{\left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime} \right)^2}{\left(E_1^{\prime} + 2E_2^{\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime} \right)^2},$$

$$L_2 = \frac{\left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime\prime} \right)^2}{\left(E_1^{\prime} + 2E_2^{\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2},$$

$$L_3 = \frac{\left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime} \right) \left(E_1^{\prime} + 2E_2^{\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2}{\left(E_1^{\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2},$$

$$L_4 = \frac{\left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime} \right) \left(E_1^{\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime\prime} - E_1^{\prime\prime} \right) \left(E_1^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2}{\left(E_1^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime\prime} - E_1^{\prime\prime} \right) \left(E_1^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2},$$

$$L_5 = \frac{\left(E_2^{\prime} - E_1^{\prime\prime} \right) \left(E_1^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right) + \left(E_2^{\prime\prime} - E_1^{\prime\prime} \right) \left(E_1^{\prime\prime} + E_2^{\prime\prime} \right)}{\left(E_1^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2 + \left(E_2^{\prime\prime} + 2E_2^{\prime\prime} \right)^2},$$

где $A\theta$ — превышение температури относительно бесконечно удаленной точки; E_{θ} — напряженность электромагнитного поля; ω — циклическая частота ЭМП; R_{θ} — радмус сферической неоднородности; R_{θ} — элементы сферической системы координат (при этом принято, что вектор E_{θ} направлен по оси θ = 0, а центр неоднородности находится в точке R = 0); C_{θ} C_{θ} — теплоемкости жидкой и твердой фаз;

 ℓ , ℓ — теплопроводности жидкой и твердой фав: ϵ — абсолютная дивлектрическая проницае— мость: ϵ' , ϵ' — действительная часть относительной диэлектрической проницаемости жидкой и твердой фаз: ϵ'' , ϵ' — мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости жидкой и твердой фаз.

Наибольший практический чинтерес представляют. исследования зависимости локального перегрева от частоты ЭМИ в температурном пиапазоне 0 4 -40 °С. где возможно существование пвухфазной системы. Анализ системы уравнений (1) показывает, что в качестве исходного материала используются теплофизические С и электрофизические 8/ 6/6 параметри тверной и жидкой фаз. Если первые слабо зависят от температуры в указанном диапазоне и не BABUCAT OF WACTOTH BMIL, TO значения вторых могут изменяться на несколько пооялков.

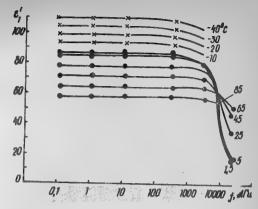


Рис. 1. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницамости с/ воды при различных температурах: — литературные данные; х аппроксимация

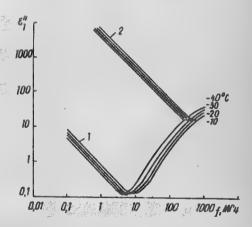


Рис. Частотная зависимость мнимой част диэлектрической проницаемости уст воды при различных температурах: 1 для пресной; 2 для морской воды

Нами обобщены разроз-

данные по электрофизическим характеристикам пресной, морской воды и льда 2-47 и полученные данные аппроксимированы в диапазон 1 4 досоо МГц для следующего ряда температур: -10, -20, -30, -40 °C. На рис. 4-4 представлены полученные частотные зависимости для воды и льда.

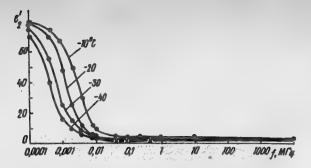


Рис. 3. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости \mathcal{E}_{j} льда при различных температурах: •, x - cm. рис. 4

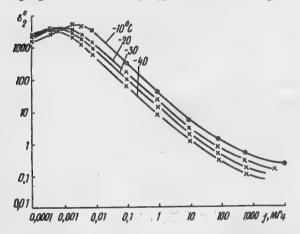


Рис. 4. Частотная зависимость мнимой части дивлектрической проницаемости . В льда при различных температурах: • , х — см. рис. 1

На основании этих электрофизических карактеристик внчислены значения $d\theta$ в исследуемой модели криоконсервированной клеточной суспензии при ее диэлектрическом нагреве. Расчет проведен для скорости нагрева ледяной матрицы d^{O} С/с, что позволило с помощью известного преобразования

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon' \varepsilon_0 \, tg \, d}{\varepsilon^2} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon^2}$$

избежать вичисления в явном виде напряженности электрического поля E_0 . Значения перегрева $A\theta$ для включений морской и пресной воды
в частотном диапазоне I + I000 МГц при разных температурах пред-

ставлены на рис. 5. Полученные результаты подтверждают наличие значительных локальных перегревов при диалектрическом разогреве криобиологических систем электромагнитным полем сантиметрового диапазона. Существенное различие значений 48 для пресной и морской воды на частотах до 200 МГн обусловлено доминирующим вкладом в 8" потерь, возникающих в морской воде за счет высокой монной проводимости. Но уже на частотах выше 4000 МГц этим различием можно пренебречь.

Из анализа системи уравнений (1) и карактера изменения электрофизических параметров на частотах выше 1000 МПц следует, что вилоть до частот, при которих выполняется условие от ретрементация покального общения воды), значения локального перегрева будут монотонно возрастать и достигнут максимума на частоте, когда выполняется равенство (1). Поскольку

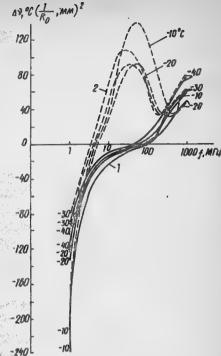


Рис. 5. Температурный перепад в оферической неоднородности отно-сительно окружающей матрицы при диэлектрическом разогреве со скоростью 1° С/с на разных частотах: 1,2,- см. рис. 2

монотонно увеличивается при снижении температуры и составляет 1,87.10⁻¹¹ с при 0 °C (2,75.10⁻¹¹ с при -10 °C) (47), то максимального значения локальный перегрев достигнет на частоте до 50 ІТц. Дальнейшее повышение частоты приводит к уменьшению значений локального перегрева. При выполнении условия 27 >> / электрофизические характеристики воды приближаются к таковым для льда. В предельном случае система уравнений (1) имеет вид

$$\Delta\theta = R^2 \frac{c_2}{2d_2} \frac{\partial\theta}{\partial t} \left[\frac{1}{3} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{d_2}{d_1} + 2 \right) \left(1 - \frac{C_1}{C_2} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{d_2}{d_1} - \frac{d_2\theta_1}{d_1C_2} \right) \right].$$

Таким образом, с ростом частоти выше 50 ITu значения локального перегрева асимптотически приближаются к уровню, определяемому теплобизическими жарактеристиками воли и льда и составлиющему ~1 °C non eropocta harpeba ледяной матрицы 1 °C/c.

Полученный результат мог он онть весьма ценным в криобиолотик. поскольку локальный перегрев в несколько гранусов является вполне приемлемим. Однако практическая полезность этого результата снижается, так как в данном частотном пианавоне глубина прони-RHOBEHER BJERTDOMAPHETHOPO HOJER COCTABLIRET HOJE MALLEMETDA.

- Нетушки А.В. Высокочастотный нагрев диалектриков и полупроводников. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 500 с.
 Никольский В.В. Электродинамика и распространение волн. М.: Наука, 1973. 460 с.
 Хиппель А.Р. Диалектрики и их применение. М.: Высш. шк., 1959. 400 с.
 Вода и водные растворы при температурах ниже 0 °С / Под ред. Ф. Франкса. Кмев: Наук. думка, 1985. 300 с.

УЛК 530.4:534.2:577.3

Ю.Б. Гайлилей

- O BSAUMOJENCTBUM BUISPOHHO BOSEVEJIEHHUX BUODOJIMMEPOB
- C BHEIIHUMU SJEEKTPOMATHUTHAMU HOJISMU

1. Введение. Проблема транспорта и хранения энергии в биологических системах - одна из центральных в биоэнергетике. Как известно, основным источником энергии, обеспечивающим функционирование организма, является реакция гидродиза аденовинтрифосфата (АТФ), в результате которой виделяется энергия около 0,43 эВ. Вероятно, знергия гидролиза запасается в виде колебательного возбуждения АТФ, которая за время, малое по сравнению со временем жизни колебания (~ 10 с), передается на белковне молекулы, где, как предложил в работе [17 А.С. Павидов, возбуждаются колебания Амид 1 (колебания связи С-О с частотой 1650 см 1) пептидной группы нисо. Сту энергию можно использовать в биологических процессах лишь в том олучае, если она будет запасена в виде компактного образования, чтобы в нужном месте и в определенный момент времени возбудать ту или иную связь и инициировать; например; требуемую химите окую реакцию. А.С. Лавидов показал /17, что энергин может эдфективно запасаться и трансформироваться в виде солитонов: неличейних волновых пакетов, об.:занных своим происхождением взаимодействир внутримолекулярных возбуждений с решеточными фононами [2]. . Итересно, что приолизительно в то же время, когда была внеказана илея о сиологической значимости солитонов, мак Клюр /37, исходи из термолинамических соображений, пришел к выводу, что энергию коле-Сательного возбуждения следует запасать в виде эксимера: сыязанного состояния возбужденной молекулы. Пыкакими расчетами, правла, Мак Клэр не подтвердил свои сосоражения.

В последние годы идея о солитоне как о переносчике энергии в биосистемах приобреда популярность (см., например, монографию [47]. Были исследованы вопросы об устойчивости этих образований при лействии на них внешних сил /2/, проанализирована их чувствительность к изменениям температуры /4-67. Влияние внешних электромагнитных полей на самосогласованные состояния внутримолекулярних возбуждений с акустическими колебаниями молекулярных систем изучалось в работах /7. 87.

Были выполнены эксперименты по комбинационному рассеянию света кристаллическими апетанилидами /97, содержащими, как и белковне молекулы, пептильне группы. В этих экспериментах было показано существование автолокализованных солитонополобных состояний. образованных за счет взаимодействия внутримолекулярных возбужиений с либрационными колебаниями или же с низкочастотными внутримолекулярными колебаниями (ВМК). Автолокализованные состояния имеют энергию связи 10 см 1 (давидовские солитони, судя по оценкам /87, имеют энергию связи ~ 1 см $^{-1}$) поэтому на них особо сильное влияние должно оказывать электромагнитное излучение миллиметрового диапазона. Если предположить, что энергин в биосистемах занасается в виде автолокализованных состояний, то ясна актуальность изучения воздействия электромагнитного излучения на ник.

В настоящей работе провнадизировани равновесные конбитурании пентилных групп в «-спиральных биополимерах. Показана возможность управления ими внешним электрическим полем. Изучены самосогласованные состояния внутримолекулярных возбуждений с ориентационными колебаниями пептидных групп. Проанализированы особенности взаимодействия электромагнитных воли с данными возбужденными состояниями

2. Равнове сная конфигурация пептилных групп в спиральных мо-«-Спиральные белковые молекулы обладают корошо выраженной квазипериодической структурой. Очень ярко эта тенденция просматривается в расположении пептидных групп молекул, положение которых, как известно /107, можно показать формулой

$$R_{nd} = R \left[\frac{2\pi}{000} \frac{2\pi}{P} (5n+d) + \frac{\pi}{1} = \ln \frac{2\pi}{P} (5n+d) \right] + \frac{\pi}{P} (5n+d) k^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

где \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} - единичные орти; $\alpha = 1, 2, 3$ - номер цепочки водородно связанных пептидных групп: n = 0, +1, +2, ... номер пептилных групп в ценочке; ? - ралиус опирали; ? - ее шаг. ? - число пептилных групп, приходящихся на один виток опирали. В реально

существующих белковых молекулах P = 3,6. Такое значение P отражает тот факт, что цепочки водородно связанных пептидных групп, в свою очередь, образуют спирали. В данной работе \ll -спиральная молекула моделируется системой из трех параллельных цепочек, оси которох проходят через вершины правильного треугольника, т.е. считаем, что в (4) P = 3.

Пептидные группи карактеризуются довольно большим стационарным дипольным моментом (д = 3.5 D [П]); диполь-дипольное взаимодействие пептидных групп - один из главных факторов, определяющих ориентацию пептидных групп в молекуле. Ориентирующее действие водородных связей будем моделировать введением электрического
поля напряженности Е, направленного вдоль оси молекул. Кроме того, поскольку белковне молекулы часто входят в состав мембран, между внутренней и внешней поверхностями которых имеется разность
потенциалов, будем считать, что помимо Б вдоль оси молекулы
приложено внешнее электрическое поле Е. Проанализируем, как меняются равновесные ориентации пептидных групп в молекуле с изменением Е.

Равнове сная конфигурация определяется путем минимизации функции

$$\mathcal{E} = -\sum_{n \neq i} \left(\mathcal{E} + \mathcal{E}_{i} \right) d_{n \neq i}^{2} + \frac{1}{2} \sum_{n \neq i, n \neq i} \left| R_{n \neq i} - R_{n' \neq i'} \right|^{-3} R$$

$$= \left[\left(d_{n \neq i} d_{n' \neq i'} \right) - 3 \left(d_{n \neq i} - \frac{R_{n \neq i'} - R_{n' \neq i'}}{|R_{n \neq i'} - R_{n' \neq i'}|} \right) \right], \qquad (2)$$

где $d_{nd} = d_g(\sin\theta_{nd}\cos\theta_{nd}, \sin\theta_{nd}\sin\theta_{nd}\cos\theta_{nd})$ — дипольный момент пентидной группы, ориентация которого определяется углами θ_{nd} и θ_{nd} .

Из трансляционной инвариантности системи вдоль оси биополимера Z оледует, что минимум функции (1) следует искать в подпространстве $\mathcal{C}_{\text{max}} = \mathcal{C}_{\text{max}}$

Анализ (1) для этого случая показывает, что конфигурации, при которых достигается минимум с, определяются соотношениями

$$Q_{1} = \theta, \qquad Q_{2} = \frac{2\pi}{3}, \qquad Q_{3} = -\frac{2\pi}{3}, \qquad Q_{3} = 0,$$
 (3)

 $Q_{g} = -\frac{d}{dt}$, $Q_{g} = \frac{d}{dt}$, $Q_{g} = dt$, which is the same Q_{g}

При этом $\cos\theta - \frac{2}{3} \frac{(f + f_n) d_g}{3(3J - 4J')}$, когда $(f + f_n) d_g < 6$ (0.75J - J') и 0.75J > J', где $J' = d_g^2 \setminus R_{nd} - R_{n+1,d} \setminus 3$; $J = d_g^2 \setminus R_{n1} - R_{n2} \setminus 3$. Если же 0.75J < J', а также 0.75J > J', но $(f + f_n) d_g > 6(0.75J - J')$, то все нептилные группы параллельны оси J:

Сравнение конфигураций (3), (4) и (5) с конфигурацией пепти— дних групп в реальных α -спиральных молекулах показывает, что ближе и реальности конфигурация (3), (4).

Интересным свойством рассматриваемой системы является то, что ориентацией пептидных групп можно управлять с помощью внешнего поля. Конфигурация (3), (4) рождается в противоборстве двух тенденций: межцепочечные взаимодействия стремятоя оставить дипольные моменты в плоскости X, Y, расположив их вдоль биссектрис треугольника; внутрицепочечное взаимодействие, водородные связи и внешнее поле стремятся ориентировать дипольные моменты вдоль оси Z.

3. Эксимерные состояния полипентидных цепочек. Как уже упоминалось, Мак Клэр 237, обсуждая возможные механизмы мышечного сокращения, высказал гипотезу, что энергия гидролиза АТФ запасается в белковых молекулах в виде эксимеров — связанных состояний возбужденной и невозбужденной молекул и, опираясь на эту гипотезу, попытался объяснить, почему энергия гидролиза АТФ не диссипирует за времена порядка 40-43 с, а может быть эффективно использовань для выполнения полезной работы.

Обсудим эту идею в рамках развитой в п.2 модели, Будем предполагать, что выделившаяся в результате гидролиза АТФ энергия приводит к возбуждению одного из ВМК пентидной группы. При переходе пентидной группы в возбужденное состояние ее дипольный момент меняется, поэтому меняется и взаимодействие возбужденной пентидной группы с невозбужденными. В результате молекулам может оказаться выгодным изменить свою взаимную ориентацию или расстояние междуними, что и приводит к образованию эксимерного состояния.

Рассмотрим сначала возбужденные состояния системы из трех пептидных групп, образующих элементарную ячейку биополимера^ж.Оператор энергии возбуждения такой системы можно представить в виде суммы

Здесь

$$\mathcal{X}_{ij\delta} = \sum_{\alpha=1,2,3} \varepsilon_{f} \, \beta_{i}^{\dagger} \, \beta_{i} + L \sum_{\alpha',\alpha' \mid (\alpha \neq \alpha')} \beta_{i}^{\dagger} \, \beta_{i}' \tag{7}$$

 $\rho = 3$. Напомним, что рассматривается спираль из пентидных групп с

^{* 00} этом свидетельствуют и оценки J' и J, полученные для параметров реальных молекул $J'\approx 1.2$ эВ, J=1.9 эВ, и видно, что 3J>4J'. При $f_{H}d_{g}=0.6$ эВ $\theta\approx 60^{\circ}$.

есть оператор энергии ВМК, где $\mathcal{S}_{\mathcal{A}}^{+}(\mathcal{A}_{\mathcal{A}})$ - оператор рождения (уничтожения) ВМК пептидной группы α ($\alpha = 1, 2, 3$); ε_{ϵ} – энергия ВМК; / - матричный элемент резонансной передачи ВМК между пептилными roymnamu:

$$R_{ar} = \frac{1}{2} \sum_{\alpha} I \left(\vartheta \dot{\varphi}_{\alpha} \right)^{2} + 3I \sin^{2} \theta \sum_{\alpha} \left(\vartheta q_{\alpha} \right)^{2} - \frac{5I}{16} \sin^{2} \theta \sum_{\alpha, \alpha'} \left(\vartheta q_{\alpha} - \vartheta q_{\alpha'} \right)^{2}$$
(8)

есть гамильтониан ориентационных колебаний пептилных групп. в которых 99 - азимутальное отклонение --пептидной группы от ее равновесного положения, задаваемого соотношениями (3): /- момент инерции:

$$+B_{5}^{\dagger}B_{3}(\partial 9-\partial 9)$$

$$(9)$$

есть оператор взаимодействия ВМК с ориентационными колебаниями системы. Злесь

$$X = \frac{1}{4\sqrt{2}} J\left(\frac{d_g}{d_g} - 1\right) \sin^2 \theta; \tag{10}$$

 $\chi = \frac{1}{4\sqrt{2}} J\left(\frac{d}{d_f} - 1\right) \sin^2 \theta;$ (10) — дипольный момент пептидной группы в возбужденном состоянии. Заметим, что кроме азимутальных колебаний имеются еще мериодинальние 🚱 ... Однако взаимодействие с ними ВМК гораздо слабее. Осуществим в (6) - (9) унитарное преобразование

$$A = \begin{pmatrix} -42 & -42$$

В результате вместо (7) - (9) получим

$$\mathcal{R}_{vib} = (\mathcal{E}_f + 2L)\mathcal{E}_S^+ \mathcal{E}_S + (\mathcal{E}_f - L) \sum_{\alpha = 1, 2} \mathcal{E}_{\alpha}^+ \mathcal{E}_{\alpha}^-, \tag{12}$$

$$\mathcal{H}_{W} = \frac{1}{2} \sum_{\beta = 2,2,3} (\dot{\gamma}_{\beta})^{2} + \frac{k}{2} (\eta_{2}^{2} + \eta_{2}^{2}) + \frac{\hat{k}}{2} \eta_{3}^{2}, \tag{13}$$

$$+ (C_2^+ C_3^- + 3.c.) \gamma_1 - \sqrt{2} (C_1^+ C_3^- + 3.c.) \gamma_2 \right]. \tag{14}$$

В адиабатическом приближении собственные функции гамильтониана (6). (12)-(14) ищем в виде

$$\Psi = \sum_{M} U_{M} \left(\gamma_{1}, \gamma_{2} \right) C_{P}^{\dagger} \left(O \right), \tag{15}$$

где 10> описывает состояние системы без ВМК. При этом собственные энергии могут быть найдены из уравнения

$$(e-\epsilon_{f}-\frac{k}{2}\eta^{2}-x\eta+L)(\epsilon-\epsilon_{f}-\frac{k}{2}\eta^{2}+x\eta+L)(\epsilon-\epsilon_{f}-\frac{k}{2}\eta^{2}-2L)-$$

$$-2(\varepsilon - e_{\xi} - \frac{k}{2} \eta^{2} + L) \chi^{2} \eta^{2} - 2(\chi \eta)^{3} \cos 3 \psi = 0. \tag{16}$$

Здесь 7 - nsin 4 7 - yeas Три корня 6 этого уравнения определяют соответственно три потенциальных функции иля ориентационных движений рассматриваемой системы пентилных групп. Примечательно при этом появление последнего слагаемого в (16). Оно отражает то обстоятельство, что в возбужденном состоянии у системы возникает анизотропия в плоскости, перпендикулярной оси молекулы, кото-POR HE CHIEF GCHOBHOM COCTOHHUM. CONTOHING CON

Между нептилными группами осуществляется интенсивный обмен всобужделинми (об этом свидетельствуют и эксперименти Невской и Чигадзе /127, показавшие, что матричные элементы резонансной передачи возбуждения между молекулами из разных спиралей водородно овязанных пептидных трулп довольно велики и составляют 42 см 1). Поэтому положим. Это

$$|u| > X |\eta|. \tag{47}$$

Иля собственных энергий получаем
$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 4 + \frac{1}{2} \cdot \eta^2 + 4 \cdot \eta^2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\chi \eta^2}{4} \cos^2 \frac{3 \cdot \eta}{2}$$
.

$$E_2 = E_5 - 4 + \frac{\lambda}{2} \int_{-\infty}^{\infty} -3\eta + \frac{2}{3} \frac{\chi^2 \eta^2}{4} \sin^2 \frac{3\eta}{2}, \qquad (48)$$

Рассматривая (18) как потенциальные функции иля ориентационных движений пептидных групп, видим, что в то время как в состояниях о энергиями є, и є, минимум потенциальных функций достигается при $\eta_* = \eta_* = 0$, в состоянии с $\varepsilon = \varepsilon_*$ минимум реализуется NOI

$$\eta = X/k$$
, $\Psi = 0$, $\frac{2\pi}{3}$, $\frac{4\pi}{3}$, (19)

т.е. в этом (эксимерном) состоянии системе выгодно изменить взаимную ориентацию пептилных групп, что позволяет добиться вниграша в энергии

$$\Delta = \frac{\chi^2}{2k} = \left(\frac{d_g - d_g}{2d_g}\right)^2 I \sin^2 \theta. \tag{20}$$

Обсудим коллективные свойства рассмотренных состояний. С этой пелью учтем, что в «спиральных белковых молекулах помимо передачи возбуждений между соседними пептидными группами из разных цепочек (4) имеется еще резонансная передача возбуждения вдоль пепочек (M). При этом, если |M| < |4| (для Амид 4|M| = 7.8 см⁻¹, а $|\mathcal{L}| = 12,4 \text{ cm}^{-1}$ (127), естественно предположить, что эксимерное состояние создается бистрее, чем возбуждение передается вдоль непочки. Тогда первому и третьему из состояний (48) в «-спиральном биополимере отвечают экситонные зоны шириной порядка М, а второму эксимерному состоянию – вона на фактор $\exp\left(-\chi^2/2k^2\,\eta^2\right)$ меньше $(7^2 = \pi / 2 \sqrt{1} k -$ квадрат амплитуды нулевых либраций пептидной группы). Ясно, что если деформация при образовании эксимерного состояния велика по сравнению с амплитудой нулевых колебаний, то эксимерное состояние практически не будет иметь дисперсии и энергия возбуждения будет сохраняться в том месте, где она была рождена.

Если на «-спиральную молекулу падает электромагнитная волна

$$E(t) = (E_{\chi}(t), E_{\chi}(t), 0),$$
 (21)

то оператор ее взаимодействия с молекулой можно записать в виде $W(t) = \sum_{n \neq i} (E(t)d_{i}) B_{n \neq i}^{+} B_{n \neq i}$, pie $d_{i} = d_{f \neq i} - d_{g \neq i}$, или, учитнвая (11), - в виде

$$W(t) = \sum_{n} \left\{ \frac{1}{\sqrt{n2}} \left(d_1 - d_2 \right) C_{n1}^+ C_{n2} + \frac{1}{\sqrt{6}} \left(d_1 - d_3^{\prime} \right) \times \right.$$

$$\times C_{n2}^{+} C_{n3}^{+} + \frac{1}{3\sqrt{2}} \left(d_{7}^{+} + d_{3}^{-} - 2d_{2}^{-} \right) C_{n1}^{+} C_{n3}^{-} \right\} E(t) + 3pm. conp. \tag{22}$$

Переход из эксимерного состояния в ближайшее и нему по энертии экситонное наиболее вероятен при частоте электромагнитного поля

$$\omega_r = 2X^2/\hbar k. \tag{23}$$

Bropon peschahenon vactoron dyner $\omega_{*}=1/\hbar (34+\kappa^{2}/k)$, onpenentiones переход из эксимерного в более высокое экситонное состояние.

Аналогичный вывод можно сделать относительно комбинационного рассеяния света (КРС) на «-спиральных молекулах, нахолящихся в состоянии возбуждения. В спектрах КРС могут наблюдаться линии. отвечающие переходам из эксимерного в экситонные (солитонные) состояния биополимеров, что может свидетельствовать об эксимерном механизме хранения энергии в биомолекулах.

По поводу частотного интервала. В котором следует искать соответствующие линии КРС поглощения света, заметим, что, поскольку, как следует из (23), $\hbar \omega_1 = 2\Delta = 0.19 \left(\frac{d}{d_{-}} - 1\right)^2 J \sin^2 \theta$, a $J \simeq 2$ эВ, то при 8 = 30-80 получим, что резонансная длина волны определяется выражением $\frac{d_2}{d_1} = 10^{-2} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1\right)^2 \text{см}$. Таким образом, для того чтобы пережоды происходили под действием волы миллиметрового диапазона, необходимо, чтоби дипольные моменты пептидных групп в основном и возбужденном состояниях отличались на десятки процентов, что вполне реально.

Работа выполнена по программе ВК "Отклик".

L. Davydov A.S. Solitons and energy transfer along protein molecules // J. Theor. Biol. 4 1977. 4 66. P. 379-387.

2. Лавыдов А.С. Солитоны в молекулярных системах. - Киев : Наук.

nymma, 4984. - 288 c. 3. Mc Clare C.W.F. A quantum mechanical muscle model // Nature.-1972. 240, N 5376. - P. 38-90. 4. Solitons / Eds S.E. Trullinger, V.E. Zakharov, V.L. Fokrovsky.-

Horth-Holland, 1986. 634 р.

5. Давидов А.С. Движение солитона в одномерной молекулярной цепочке с участием тепловых колебаний / Ж. эксперим. и теор. физики. 4980. 78, № 2. С. 789-796.

6. Давидов А.С. Квантовая теория движения квазичастицы в молеку-

лярной цепи при учете тепловых колебаний // Физ. многочастич. систем. - 1987. - № 12. - С. 1-20.

7. Бремко А.А. Диссоциация давидовских солитонов в поле электромагнитной волны // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1984. — " 3. —

8. Eremko A.A., Gaididei Yu.B., Vakhnenko A.A. Dissociation-accompanied Raman scattering by Davydov solitons // Phys. sta-

tus solidi. B. - 1985. - 127. - P. 703-713.

9. Bilbeck J.C., Lomdahl P.S., Scott A.C. Soliton structure in crystalline acetanilide // Phys. Rev. B. 1984. - 30, N 8.-P. 4703-4712

^{*} Предполагается, что деформация в эксимерном состоянии вели-ка по сравнению с амплитудой нулевых вибраций.

10. Павидов А.С. Биология и квантовая механика. — Киев: Наук.дум-ка, 1979. — 296 с.

II. Hol W.G.J., Van Duijnen P.T., Berendsen H.J.C. The alpha-helix dipole and properties of proteins // Nature. - 1978. - 273, N 5662. - P. 443-446.

12. Nevskaya N.A., Chigadze Yu.N. Infrared spectra and resonance interaction of Amid I and II vibrations of &-helix // Biopolymers. - 1976. - 15. - P. 639-649.

УЛК 536; 557; 574; 577

А.В. Чалый

BILVIHUE BHEWHETO DIEKTPOMATHUTHOTO HOUR HA TIPOLIECCH VIIOPAJOUEHUM B CPEJIAX C BUOXUMUYECKUMU PEAKLUMMU

Важной спецификой систем, в которых происходят процессы упорядочения и самоорганизации, является существенное влияние на их свойства различних внешних воздействий (механических, жимических, электрических, магнитных, электромагнитных и др.). Для понимания сушности процессов происходящих в открытых медико-биологических системах (прежде всего в организме человека) во внешних полях, рассмотрим вопрос об образовании упорядоченных структур на уровне биохимических реакций, ответственных за синаптические механизмы передачи информации.

1. Среди развитих к настоящему времени методов описания проне ссов образования пространственных структур и ритмических явлений наиболее последователен метод, использующий современные теории фазовых переходов и критических явлений /1, 27. Именно на этой строгой теоретической основе удается объяснить наличие когерентности на макроскопически больших расстояниях и временах. Особенность такого подхода, которая отсутствует в методах, основанных на применении кинетических моделей и теории нелинейных колебаний, заключается также в принципиальной возможности установления связи различных важных характеристик процессов упорядочения (например. пространственных и временных периодов когерентных структур) с физическими и другими параметрами исследуемых систем [3, 47.

Явления, происходящие вблизи линий (точек) фазовых переходов или границ устойчивости однородного состояния вещества, обладают универсальной общностью. Причина связана с коллективной, синергетической природой этих явлений и с определяющей ролью взаимодействия флуктуаций характерного параметра порядка исследуемой системы. Именно это обстоятельство лежит в основе известного принципа образования упорядоченных структур - "норядок через флуктуации".

Вняснение основных закономерностей в поведении систем волизи линий фазовых переходов и границ устойчивости (в дальнейшем прец-66 production and the second s

полагается, что исследуемая система, включая человеческий организм, находится именно в таком состоянии с аномально большой восприимчивостью к внешним воздействиям) требует виделения главной, управляющей моды или, что то же самое, параметра порядка и учета флуктуаций этого параметра порядка, скоррелированных на больших расстояниях и временах.

Параметром порядка системы с химическими (биохимическими) реакциями является степень полноти $\xi(\vec{r})$, определяемая как

$$d_{\mathcal{F}}(\mathcal{F}) = dn_{i}(\mathcal{F})/I_{i}, \tag{1}$$

где $dn_i(\vec{r}) - dn_i(\vec{r})/l_i$, (1) кимической реакции; 👣 - стехнометрические коэффициенты. Сопряженной для степени полноти (С) величиной является сродство реакции 4 (7), представляющее собой линейную комбинацию химических потенциалов компонентов смеси:

$$A(\mathcal{F}) = \sum_{i \geq 1} Y_i A_i(\mathcal{F}). \tag{2}$$

Величина, обратная восприимчивости Х биохимической реакции, выражается согласно формуле

$$z^{-1} = \left(\frac{\partial A}{\partial \xi}\right)_{P,T} = \sum_{i,j} i, y_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j}\right)_{P,T,H_i} + u_i$$
 (3) через производные от химических потенциалов по числу молей компо-

нентов, участвующих в реакции. Эта величина, точнее нулевой пространственный можент прямой корреляционной функции (ПКФ) С (*) биохимической реакции, представляемая в виде

$$C_0 = \int C(r) d\vec{r} = -\frac{1}{kT} \left(\frac{\partial A}{\partial \xi} \right)_{P,T} , \qquad (4)$$

определяет коаффициент при квадрате параметра порядка в разложении флуктуационной части свободной энергии Гиббса.

2. Представим исследуемую систему как жидкий диэлектрик, накодицийся во внешнем электрическом поле. Химический потенциал такой системы имеет вид /57

$$M = M_0 - \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T E^2, \tag{5}$$

где 🥠 - химический потенциал среды в нулевом поле. С учетом соотношений (1) - (5) вклад в величину Со, связанний с наличием электрического поля, составляет

$$aC_0^E = -\frac{\mathcal{E}_0 E^2 N_A}{2 k_B T} \sum_{i,j} J_i J_j \left(\frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial \rho_i \partial \rho_j} \right)_T$$
 (6)

Видно, что этот вклад пропорционален квадрату напряженности электрического поля и второй производной от диалектрической проницаемости по плотности. Принимая во внимание корреляционные поправки от эффектов пространственной дисперски и величине диэлектрической проницаемости, определяемой стандартным приближением Ловенти Лоренца, можно показать, что

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}_{xop}}{\partial \rho_i \partial \rho_j} \sim \begin{cases} R_C^{1+2/\zeta} & \text{npn} & kR_C = 1, \\ R_C^{\frac{2}{\zeta}-1} & \text{npn} & kR_C > 1, \end{cases}$$
 (7)

где 1 - волновое число; 1 - радиус коррелящим флуктуаций параметра порядка. Согласно (7) при переходе через границу устойчивости в области сильной пространственной дисперсии, где А. эторая производная $\partial^2 \mathcal{E}_{\kappa op} / \partial \rho$, $\partial \rho$, имеет особенность, поскольку критический индекс $\mathcal{E} \approx 1.8$ и $\frac{2}{5} - 1 \approx 0.1$.

Если среда обладает не только электрическими, но и магнитными свойствами (биологические ткани организма человека являются. как правило, диамагнетиками), а также находится во внешнем электромагнитном поле, то вклад в величину $\mathbf{C}_{_{\mathrm{O}}}$ определяется соотношением

$$\Delta G_{\delta}^{E,H} = -\frac{N_{A}}{2k_{B}T} \sum_{i,j} J_{i} V_{j} \left(\delta \frac{\partial^{2} \varepsilon}{\partial \rho_{i} \partial \rho_{j}} E^{2} + \tilde{N_{O}} \frac{\partial^{2} \tilde{N_{O}}}{\partial \rho_{i} \partial \rho_{j}} H^{2} \right), \tag{8}$$

где 🖟 - относительная магнитная проницаемость; Н - напряженность мегнитного поля.

Нулевой момент ШКФ, как отмечалось выше, определяет обратную восприимчивость, а совместно со вторым пространственным моментом С2 - радиус корреляции флуктувций степени полноты биохимической реакции. Последний результат может онть получен и проанализирован на основе общей теории критических флуктуаций параметра порядка во внешних полях, развитой в /67. В отсутствие электромагнитного поля радиус корреляции

$$R_{c}^{0} = \sqrt{\frac{c_{2}}{c_{0}}} = \left\{ \frac{N_{N}}{k_{S}TC_{2}} \sum_{i,j} l_{i} l_{j}^{i} \left\{ \frac{\partial P_{iC}}{\rho_{i}} + \frac{\partial}{\rho_{j}} \left[\frac{P - P_{iC}}{\rho_{i}} - \frac{1}{\rho_{i}} \left(\frac{\partial P_{i}}{\partial T} \right)_{\rho} (T - T_{iC}) \right] \right\} \right\}^{-1/2}$$
(9)

определяется лишь одизостью температуры и давления системы с био**химическим**и реакциями к их критическим значениям $\frac{1}{100}$. Под действием внешнего электромагнитного поля изменяется радиус корреляции

$$R_{C}^{E,H} = \left\{ C_{2} / \left[C_{0} - \frac{N_{0}}{2k_{0}T} \sum_{i,j} V_{i} V_{j} \left(\varepsilon_{0} \frac{\partial^{2} \varepsilon}{\partial \rho_{i} \partial \rho_{j}} E^{2} + \widetilde{R_{0}} \frac{\partial^{2} \widetilde{R}}{\partial \rho_{i} \partial \rho_{j}} H^{2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (40)$$

Полученное значение изменения радиуса корреляции можно интерпретировать в терминах изменения критических параметров вещества:

а) критической температуры

$$I_{ic}^{*}(E,H) = I_{ic} \frac{\rho_{i}}{2} \left(\frac{\partial I}{\partial \rho_{i}} \right) \left(\mathcal{E}_{0} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \rho_{i}} E^{2} + \tilde{H}_{0} \frac{\partial \hat{H}}{\partial \rho_{i}} H^{2} \right) \tag{A1}$$

при неизменном критическом значении парциального давления / ;

$$P_{ic}^{*}(E,H) = P_{ic} + \frac{\rho_{i}}{2} \left(\varepsilon_{0} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_{i}} E^{2} + \overline{N_{0}} \frac{\partial \overline{N}}{\partial \rho_{i}} H^{2} \right) \tag{32}$$

при неизменном значении /...

Критические параметри Р и Тіс компонентов биохимической реакции могут сильно различаться. Поэтому зависимость восприимчивости $x=|\partial A/\partial f|$ в изобарных условиях от температуры представляется достаточно сложной функцией, достигающей локальных макоимумов с приближением к критическим значениям / (Е, Н) каждого из компонентов. Главный максимум в этой зависимости соответствует, очевидно, реализации критического (бифуркационного) значения для основного параметра порядка - управляющей моды биожимической ре-

3. Проанализируем условия образования упорядоченных отруктур в системе с биохимическими реакциями при наличии внешнего электромагнитного поля. Пусть исходное состояние биохимической системы таково, что нулевой и второй пространственные моменты ПКФ являются положительными:

$$C_0 = -\frac{1}{k_B T} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right)_{P,T} = \int C(r) dr > 0,$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \int C(r) r^2 dr > 0.$$

В этом случае статическая парная корреляционная функция (КФ)

$$Q_{2\xi}(R) = \frac{1}{k_{\xi}T} \langle \xi G_{\xi}^{-} \rangle \xi (F_{\xi}^{-}) \rangle, \quad R = |F_{\xi} - F_{\xi}^{-}|.$$

флуктуаций степени полноти, описывающая взаимное влияние характера протекания омохимической реакции в различных точках системы (например, организма человека), имеет следующий вид в трежмерном пространстве:

$$\mathcal{L}_{2F}(R) = \left(\frac{V}{4\pi k_B T C_2}\right) \exp\left(-\frac{R}{R_E}\right) / R, \tag{13}$$

где радиус коррелниии R_c определяется формулой (9) или (40). Видно, что с приближением к границе термодинамической устойчивости биохимической системы, на которой нулевой момент $\Pi K \Phi C_0 = 0$, корреляции между локальными флуктуациями степени полноты F(F) медленно убивают с расстоянием $(G_{2F} \sim R^{-1})$, т.е. становятся дальнодействующими. Этот результат означает, естественно, что статические структуры в такой биохимической среде не могут возникнуть.

Ситуация радикально изменится при смене знака одного из моментов, т.е. при условии, что $C_0 < \ell_1$, $\ell_2 > \ell$ (термодинамически неустойчивая система) или $C_0 > \ell$, $C_2 < \ell$ (среда с восходящей диффузией, т.е. с отрицательным коэффициентом диффузии). Рассмотрим среду с биохимическими реакциями на нетермодинамической ветви состояний ($C_0 < \ell$, $\ell_2 > \ell$). Для такой трехмерной среды КФ флуктуаций стенени полноты биохимической реакции

$$G_{5} \sim N_{1/2} \left(\frac{|\vec{r_{5}} - \vec{r_{2}}|}{2 R_{1/2}} \right) / |\vec{r_{7}} - \vec{r_{2}}|^{1/2},$$
 (14)

где $N_{2}(2)$ — цилиндрическая функция Неймана, а радиус корреляции $R = \sqrt{2/|\mathcal{C}_1|}$. Результат (14) означает, что в системе возникает медленно затухающая, периодическая в пространстве корреляция между локальными значениями степени полноти f(F), т.е. реализуется когерентное влияние биохимических процессов в различных объемах на расстояниях порядка длины возникающих упорядоченных структур $\frac{1}{2} \frac{2\pi}{2} \sqrt{2}/|\mathcal{C}_1|^2$. С приближением к границе устойчивости ($\mathcal{C}_2 = 0$) характерный размер периодических биохимических структур становится достаточно большим, достигая мекроскопических величин.

Обратимся к полученным ранее формулам для C_0 в отсутствие электромагнитного поля и для поправки $AC_0^{(c,d)}$, вызванной включением электромагнитного поля. Легко видеть, что если вначале G>0, то, поскольку $AC_0^{(c,d)}<0$, может произойти изменение знака величины нулевого можента при E, $H\neq 0$: $C_0+AC_0^{(c,d)}<0$ достигается при достаточно больших величинах напряженностей E и H, а также при аномально больших значениях произволных $A^2E/\partial \rho$, $A\rho$; и $A^2N/\partial \rho \partial \rho$. Как отмечалось выше, рост производных может реализоваться волизи точек фазовых переходов. Кроме того, существенное возрастание производных возможно в результате специфических для CBV и KBV диапазонов резонансных эффектов в диэлектрических средах, входящих в организм человека (вода, кровь, лимфа, спинномозговая жидкость и др.).

Очевидно, под влиянием внешнего электромагнитного поля промскодит переход биохимической системы из области термодинамической устойчивости (${\rm C_O}>0$) в термодинамически неустойчивую область

 $(C_0 + AC_0^{F,N} < 0)$. Однако последнее состояние обладает (и это имет принципиальное значение) структурной устойчивостью в том смноле, что благодаря эффекту нелокальности (пространственной дисперсии) флуктуаций f(F) величина $C_0 + AC_0^{F,N} + C_0 k^2 > 0$. Отсюда следует соотношение для характерного размера упорядоченной структуры в области термодинамической неустойчивости : $A_0 = 2\pi/k = \sqrt{C_0}/(C_0 + AC_0^{F,N})$ Таким образом, физико-химический механизм перехода системы в упорядоченное состояние под действием электромагнитного поля основан на эффективном изменении температуры и давления и, как следствие, на изменении знака нулевого момента ПКФ, переводящих ранее устойчивую бе сструктурную систему под границу устойчивости (спинодаль), где термодинамическая неустойчивость стабилизируется возникновением когерентных упорядоченных структур.

4. Для частот химических (биохимических) и электромагнитных процессов в СВЧ и КВЧ диапазонах имеет место сильное неравенство $V_{3-M} \gg V_{500XMM}$, что позволяет оценивать эффекты воздействия внешних электромагнитных полей как усредненные за период биохимической периодической реакции.

В среде с дисперсией происходит диссипация электромагнитного излучения, связанная с ее поглощением 257. Для монохроматической электромагнитной волны частоты 40 количество энергии, поглощенное за единицу времени в единице объема среды, составляет

$$\theta = \omega(\xi \varepsilon'' \tilde{E}^2 + \tilde{\mu}_0 \tilde{\mu}'' \tilde{H}^2),$$

где \mathcal{E}'' и \mathcal{M}'' — мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости, а черта означает усреднение по времени. С учетом равенства электрической и магнитной составляющих плотности энергии в электромагнитной волне и очевидного соотношения $\mathcal{E}^2 = 1/2 \mathcal{E}_0^2$, где \mathcal{E}_0 — амплитуда напряженности электрического поля, имеем \mathcal{Q} = \mathcal{E}_0 \mathcal{E}_0 \mathcal{E}_0

Для оценки численного значения Q примем, что длина волны электромагнитного излучения d=3 мм, т.е. $\omega\approx 6,3\cdot 10^{11}$ рад/с, а поверхностная плотность подводимой к объекту мощности в электромагнитной волне (вектор умова — Пойнтинга) $|\vec{3}|=2w_Ec-2eg\,\vec{E}^c=-\epsilon\varepsilon_0E^2_0c$ имеет порядок $|\vec{5}|\approx 4$ мВт/см $^2=40$ Вт/м 2 . Отсюда следует, что объемнан плотность энергии электромагнитной волны $\varepsilon\varepsilon_0E^2_0=|\vec{5}|/c\approx 3\cdot 10^{-3}$ Дж/м 3 . Учитывая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости волизи точек фазовых переходов в результате учета парных коррелыций по порядку величины составляет $\varepsilon^n\approx 10^{-4}$ ε^n $\varepsilon^$

Полученный результат необходимо сравнить с тем значением

энергии единици объема физико-химической системы, которое нужно сообщить за единицу времени, чтобы достичь границу устойчивости этой системы. Другими словами, следует оценить величину (Р/ -Ріс.) У бизгом при изотермическом полходе к границе устойчивости или величину $(\partial P/\partial I)_{\rho}(I-I_{iC})$ I_{SUORUM} при ее изобарном достижении. Используя реальные значения отклонений давления и температуры от их критических значений: $(P-P_{ic})/P_{ic}\approx 10^{-5}$ и $(P-P_{ic})/P_{ic}\approx 10^{-5}$, а также размерную оценку производной $(\partial P/\partial I)_0\approx nP_c/I_c$, где $n\approx 1$ (в модели Ван-дер-Ваальса n=4), и, принимая, что $P_{ic}\approx 10^{-5}$ Па и P_{ononum} $\approx 10^{-2}$ с $= 10^{-5}$ нолучаем

$$(P-P_{ic})^{1}\delta_{HONUM} \approx 10^{-2} BT/M^{3}, \tag{15}$$

$$(\partial P/\partial T)_{p}(T-T_{ic})^{1}\delta_{HONUM} \approx 4.10^{-2} BT/M^{3}.$$

Сравнение оценок величини 🗗 и приведенных в (45) значений показывает, что достаточно малые мощности электромагнитного излучения миллиметрового диапазона могут вызвать переход системы о биохимическими реакциями через границу устойчивости и образование в ней упорядоченных структур. Критерием образования таких структур под действием внешнего электромагнитного поля является выполнение следующих неравенств:

HOM P=const

$$a_{\varepsilon}^{\prime} \mathcal{E}_{o} \mathcal{E}_{o}^{2} / \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)_{\rho} (T - I_{ic})^{\prime} \mathcal{E}_{uoxum} > 1,$$
 (16)

HDW /= const

Из (16) и (17) следует, что образование упорядоченых структур в системах с биохимическими реакциями под воздействием алектромагнитного поля опособствует увеличение частоты электромагнитных колебаний, амплитулы Е электрического поля, мнимой части в дизлектрической проницаемости, а также уменьшение частоты нериодических биохимических (или химических) процессов Ублоким и приближение термодинамических параметров (температури и давления) к их критическим (бифуркационным) значениям, т.е. уменьшение откло-HEHMI $T-T_{in}$ VI $\rho-\rho_{in}$

Полученные результаты позволяют предлюжить следующий реалистический механизм влияния электромагнитного излучения СВЧ и КВЧ диалазонов на физико-жимические (биожимические) процессы, проискодищие в организме человека. Воздействующее излучение (например. на биологически активные точки) резонансно поглощается по одному

или нескольким молекулярным каналам. Детальная схема функционирования этих каналов полжна онть основана на микроскопических соображениях, полобных рассмотренным в /97 и использующих методы квантовой механики и молекулярной биобизики. Заметим, что одним из интересных вопросов, связанных с этим направлением исследований, является выяснение частотной зависимости электродинамических карактеристик типа $\mathcal{E}^{\#}$ и $\mathcal{N}^{\#}$ ответственных за поглощение электромагнитного излучения в биологических тканях и жилкостях организма человека, а также установление их экстремальных свойств для СВЧ и КВЧ диапазонов электромагнитного излучения. Поглощенное электромагнитное излучение приводит к возникновению нового типа упорялочения, который характеризуется когерентным карактером протекания биохимических реакций из-за наличия дальнодействующей, макросконической и периодической в пространстве связи между локальными значениями степени полноты реакции. Возникающие пространственные структуры обладают, как указывалось выше, экстремумами восприимчивости к внешним воздействиям, а также экстремальными значениями коэффициента электропроводности 6. Действительно, величина б определяется пространственно-временной КФ токов, которая в разумном приближении выражается через произведение корреляторов скоростей и концентраций. Последний коррелятор непосредственно связан с восприимчивостями компонентов смеси. Таким образом, нолучаемые пространственные когерентные структуры, обладающие экстремумами восприимчивости и электропроводности, и есть те направления (их можно назвать, если угодно, и мерицианами), вдоль которых осуществляется синаптическая передача информации.

Работа выполнена по программе ВК "Отклик".

Патешинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. — М.: Наука, 1975. — 256 с.
 Вильсон К., Когут Лж. Ренориализационная группа и € -разложение. — М.: Мир, 1975. — 302 с.
 Чалый А.В. Методы теории фазовых переходов в проблеме структуро-образования // Теоретические и математические аспекты морфогенеза. — М.: Наука, 1987. — С. 245-255.
 Chalyi A.V., Wezhinskii I.V., Sysoev V.M. The fluctuation mechanism of the formation of spatio-temporal structures in chemically active systems // Proc. Int. Workshop on Norlinear and

mically active systems // Proc. Int. Workshop on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics. - Gordon and Breach, New York. 1984. = P. 719-736.

5. Ландау Л.А., Лифшин Е.М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. — 620 с.
6. Лакоза Е.Л., Сысоев В.М., Чалый А.В. Критические флуктуации во внешних полях // ж. эксперим. и теор. физики. — 1973. — 65. —

C. 605-616. 7 Larsen S., Mountain R., Zwazig R. On the validity of the Lorentz-Lorenz equation near the critical point // J. Chem. Phys. - 1965. - 42. - P. 2187-2192.

8. Олейникова А.В., Питанов Н.Л., Чалый А.В. Рефракция света волизи критической точки с учетом эффектов пространственной диспер-

сии//Оптика и спектроскопия.—1984.—56, вып.6.—С.1066—1071.

9. Ситько С.П., Сугаков В.И. О роди спиновых состояний в белковых молекулах // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1984. — 16. — С.65—69.

УЛК 57.043

В.Б.Швед, В.Д.Бобришев

КОНТРАСТИРОВАНИЕ ЗОН ХОЛОТОВОЙ НЕКРОТИЗАЦИИ В СОЧЕТАНИИ С МИКРОВОЛНОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Для локального необратимого разрушения биологической ткани, в том числе патологических новообразований, в медицинской практике широко распространена криодеструкция, т.е. замораживание ткани до температур, при которых их последующая реабилитация невозможна. В литературе хорошо отражены достоинства криохирургии, например высокая терапевтическая эффективность, активизация иммунологической системы, косметологический эффект.

Вместе с тем нетрудно показать, что для гарантированного разрушения патологических новообразований замораживанию последних будет сопутствовать значительное замораживание и переохлаждение окружающих здоровых тканей.

В данной работе предлагается использовать СВЧ излучение предпочтительно миллиметрового (мм) диапазона, для снижения эффекта
колодового повреждения здоровых тканей при криодеструкции.

Упрощенная математическая модель, описывающая процесс замораживания при криодеструкции, может быть представлена одномерной нестационарной задачей Стефана [4], 27

$$(A(u)/z(u)_u + L_{\sigma}(u)\rho(u) + \rho \sigma (u-u*)]z_u + w(u)z(u) = 0,$$

тде $z = z(\ell, t)$ — искомая координата изотермы ℓ из температурного интервала $\ell_{A}(t) \leq \ell \leq \ell_{M}$; t — время; $A(\ell)$, $C(\ell)$, $C(\ell)$ — коэффициент теплопроводности, теплоемкости и плотности соответственно; $W(\ell)$ — мощность источника тепла; $D = \ell_{A}D$; A — скрытая теплота кристаллизации; $\partial \ell z = z^*(t) \mathcal{I}$ — дельта—функция Дирака; $z^*(t)$, $z_{M}(t)$ — подлежащие определению подвижные координать изотермы замораживания и биоткани соответственно; $\ell_{A}(t)$ — температура охлаждающей поверхности криоинструмента; ℓ_{A} , ℓ^* , ℓ^* , ℓ_{M} — температура криопоражения, замораживания, биологической ткани соответственно. При этом выполняются условия

$$u_{A}(t) < u < u_{m}, \quad t > 0, \quad u_{A}(0) \leq u_{A} < u^{*},$$
 $u_{A}(t) < u_{M}, \quad z(u, 0) = z(u) = 0, \quad z(u_{A}(t), t = 0,$
 $z(u_{m}, t) = z_{m}(t), \quad z(u^{*}, t), \quad z^{*}(t), \quad z_{u} = z_{u}(u_{m}, t) = +\infty.$

В стационарном случае для плоской криодеструкции, принимая, что метаболизм в замороженной зоне отсутствует, а в незамороженной определяется как $M = W_0(u_m - u_s)$, задача имеет следующее аналитическое решение:

$$\widetilde{z}_{(u)} = \begin{cases}
(z_0 + t)(u^* - u_0)^{-1}(u - u_0) & \text{npn} \quad u_0 \le u \le u^*, \\
(z_0 + t) + \sqrt{\frac{x_m}{w_0}} t_n \frac{u_m - u^*}{u_m - u} & \text{npn} \quad u^* \le u \le u_m.
\end{cases}$$
(1)

Выражение (4) решим относительно 4:

$$u = \begin{cases} u_0 + \frac{z}{z_0 + t} \left(u^* - u_0 \right) & \text{при} \quad z_0 \le z \le z_0 + t \end{cases},$$

$$u_m - \left(u_m - u^* \right) e^{-\sqrt{\frac{N_0}{A_m}}} \left[z - \left(z_0 + t \right) \right] & \text{при} \quad z \ge z_0 + t \end{cases},$$

$$u = \begin{cases} u_0 + \frac{z}{z_0 + t} \left(u^* - u_0 \right) & \text{при} \quad z \ge z_0 + t \end{cases},$$

$$u = \begin{cases} u_0 + \frac{z}{z_0 + t} \left(u^* - u_0 \right) & \text{при} \quad z \ge z_0 + t \end{cases},$$

$$u = \begin{cases} u_0 + \frac{z}{z_0 + t} \left(u^* - u_0 \right) & \text{при} \quad z \ge z_0 + t \end{cases},$$

$$u = \begin{cases} u_0 + \frac{z}{z_0 + t} \left(u^* - u_0 \right) & \text{при} \quad z \ge z_0 + t \end{cases},$$

$$u = \begin{cases} u_0 + \frac{z}{z_0 + t} \left(u^* - u_0 \right) & \text{при} \quad z \ge z_0 + t \end{cases},$$

Используя (2), оценим глубину дополнительного колодового поражения здоровых тканей при плоской криодеструкции локального участка головного мозга глубиной 5 10⁻³ м. Нами использованы теплофизические карактеристики, принятые в медицине /3/. Температура гарантированного криопоражения равна — 20°С /3/, допустимая температура переоклаждения здоровых тканей мозга составляет 32,5°С.

Согласно решению (2), получаем $u_A = -33.6$ °C, $z_0 + t =$ $= 12.4 \cdot 10^{-3}$ м, $z_{00} = z_0 + t + 7.2$ х 10^{-3} м. Температурная картина, соответствующая этому случаю, представлена на рис. 1.

Таким образом, гарантированному криопоражению опухоли размером 5 10⁻³ м сопутствует дополнительное повреждение здоровой ткани на глубину 14.6* *10⁻³ м.

Рассмотрим такой процесс замораживания, когда сквозь замороженную зону осуществляется подвод СВЧ энергии.

Коэффициент поглощения в

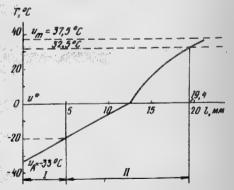


Рис. 1. Стационарная температурная картина при плоской криодеструкции участка головного мозга глуонной 5 10 м. 1 — зона гарантированного криопоражения: 11 — зона дополнительного колодового повреждения здоровых тканей

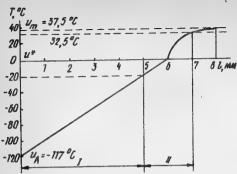


Рис. 2. Стационарная температурная картина при плоской криодеструкции участка головного мозга глубиной 5 х х 10-3 м в случае подвода 61,мм сквозь замороженную зону СВЧ излучения: I и II - см.

замороженной зоне более чем на порядок ниже коэффициента поглощения в незамороженной ткани, поэтому в первом приближении считаем. что преобразование СВЧ энергии в тепловую осуществляется на границе незамороженной зоны. Пренебрегая энергией метаболизма по сравнению с СВЧ энергией и считая, что последняя выделяется в ткани по закону $P = P_n \exp x [-\lambda(z-z^*)]$, где λ^{-1} глубина проникновения, приведем решение (2) к виду

$$\widetilde{Z}(u) = \begin{cases}
l \frac{u - u_0}{u^* - u_0}, & u_0 \le u \le u^*, \\
l = \frac{\lambda_1 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_1 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_1 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*) \sqrt{\lambda_2 w_0}}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)}, \\
l = \frac{\lambda_2 (u^* - u_0)}{(u_m -$$

Из решения (3) следует, что при Р. д - / д = и получим уже на расстоянии 3/4 от границы замораживания 35 %-ное значение нормальной температуры ткани, т.е. практическое отсутствие переохлаждения. Поскольку 1/« для СВЧ излучения в мм диапазоне составляет доли миллиметра, то введение СВЧ источника резко снижает эффект колодового повреждения здоровых тканей.

Оценим значение P_0 при $P_0 \, \alpha^{-2}/\Lambda_2 = u_m - u^*$. Принимая $\Lambda_2 =$ = 0.52 BT/M·K, $u_m = 37.5$ °C, $u^* = 0$ °C, $1/\alpha = 5.10^{-4}$ M (onpeпеляется вибором частоти СВЧ излучения и соответствует мм диапавону). получаем ва 4 Вт/см

На основании решения (3) оценим глубину дополнительного поражения здоровых тканей головного мозга при криодеструкции участка 5.40-3 м в случае, когда сквозь замороженную зону подается СВЧ излучение мм диапазона с энергией Р 2 / 1 м = им и глубиной проникновения 5.10^{-4} м. В результате получаем $u_{\rm s}=-117,5^{\rm o}{\rm C}$, $z_o + l = 6.0$ mm, $z_{no} = z_o + l + 1.0$ mm. Температурная картина, соответствующая этому случаю, изображена на рис. 2. Глубина дополнительного поражения составляет 2 мм.

Из рассмотренных частных случаев следует, что подвод СВЧ излучения сквозь замороженную зону значительно уменьшает дополнительное поражение здоровых тканей при криодеструкции новообразований.

4. Березовский А.А. Одномерная локальная задача Стефана плоскопарадлельной криодеструкции биологической ткани / Задачи те-плопроводности с подвижными границами. - Киев, 1985. - С.3-8. 2. Березовский А.А. Одномерные модели локального замораживания биоткани // Нелинейные задачи теплопроводности. - Киев, 1984. -

C. 3-8.

3. Комини Г., Дель Джиуличе С. Тепловне аспекты криохирургии // Теплопередача. - 1976. - № 4. - С. 8-16.

УЛК 577.3

И.Г.Радченко, И.А.Слабкая

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ РАБОТЫ СИНАПСА КАК НЕРАВНОВЕСНОЙ СИСТЕМЫ. ВОСПРИИМЧИВОЙ К ВЛИЯНИЮ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В условиях сильного отклонения от равновесия возникает качественно новый характер взаимодействия внешних физических полей с системой. Волизи критических точек, так называемых точек бифуркации, система обладает рядом особенностей, одной из которых является аномальное возрастание восприимчивости к внешним воздействиям /17. Однако априори не ясна степень применимости указанных результатов ко всему многообразию критических явлений в реальных системах.

В качестве реальной неравновесной ситуации в настоящей работе исследуется популяция ацетилхолиновых рецепторов в постсинаптической меморане - концевой пластинке. Основой рассмотрения является гипотеза о взаимосвязанности кратковременного изменения проводимости ионных каналов и так называемого фазового расслоения волно-белковой матрицы в примембранной области. По-видимому, впервые на связь между изменением проницаемости возбудимой нервной мемораны и состоянием воды обратил внимание И.М.Клоти /2/. Автор. как и многие другие исследователи, не рассматривал динамические и структурные аспекты процесса, тем более влияние физических полей. Однако нам кажется ценной и важной идея Клотца о способности воли образовывать кооперативные системы в гидратной оболочке белков и меморанах. Это явление лежит в основе процессов, происходящих на молекулярном уровне, но ведущих к макроскопическому результату, измеряемому как отклик рецепторной популяции.

В качестве базы для построения динамической модели выбирается часто используемая схема реакций бимолекулярных стаций /3/

$$A + R = \frac{k_1}{k_2} AR^* = \frac{k_3}{k_3} R + R^* = \frac{k_2}{k_2} - R$$

где A – молекула ацетилколина; R – рецептор в исходном состоянии; R^* – комплекс ацетилколин-рецептор; R^* – рецептор в активированном состоянии; P_A – продукт распада ацетилколина под действием ацетилколинастерази; k, k, k, k, k, — коэффициенты скоростей реакции.

Приведем уравнения, описывающие кинетику этой реакции:

$$\dot{g} = d(r_0 - y)k_1 - k_3 y - k_{-1} y, \qquad (1)$$

$$\dot{x} = k_3 y - k_2 x \tag{2}$$

где X — концентрация R^* ; y — концентрация M^* ; d — концентрация ацетилхолина; r_0 — начальная концентрация рецепторов.

При этом в общем виде описнвается процесс кратковременного увеличения концентрации ацетилколина в синаптической щели, об результате чего рецепторно-канальные молекулы переходят в активированное состояние, а затем, после быстрого удаления ацетилхолина (вследствие диффузии и действия эстеразы), релаксируют к исходному состоянию с дискретным изменением проводимости каналов.

Закономерным представляется то, что ионы затрачивают на прокождение канала 10-7 - 10-8 с. т.е. время, исключительно близкое к периоду обмена молекулы воды возле иона. По современным представлениям рецепторы как белковые структуры имеют динамическую воднобелковую матрицу. Движение белковых цепей происходит со временем корреляции $10^{-8} - 10^{-10}$ с. Этому способствует время t, нехождения субъединицы рецептора в конформации, комплементарной ацетилколину. При связывании ацетилколин "фиксирует" эту конформацию на более продолжительное время. Происходят унорядочение водно-белковой матрицы, увеличение числа и изменение ловализации доступных активных центров на поверхности субъединиц. При этом молекулам води термодинамически выгодно находиться в виде упорядоченной кооперативной структури (кластеров) с временем жизни ≥10-8 с [4], зависищим от свойств белка и внешних условий. Это время на несколько порядков больше, чем время жизни водородных связей в гомогенной жидкой воде: 10-11 - 10-12 с. Такое упорядоченное состояние можно классифицировать как открытое, реализуемое в процессе "растворения" субъединиц рецепторов с образованием канала. Одновременно с "растворением" повышается константа диссоциации комплекса рецептор - медиатор. В результате освободившиеся под действием молекулярного движения молекулы ацетилколина гидролизуются (за 3 -4 мкс) ацетилколинэстеразой и не оказывают повторного действия. 78

Для данного рассмотрения важно, что при взаимном приспособлении конформации белка и води конкуренция клатратации, гидратации и других взаимодействий в матрице приводит ее к неравновесному состоянию. Структурные элементи взаимодействующей с рецепторами води в момент оккупации и после него становятся более многообразными, в том числе и с некомпенсированными дипольными моментами, карактерными для клатратов [5]. Дальнодействие этого процесса за счет кооперативной перестройки водородных связей распространяется по меньшей мере на всю зону выброса кванта ацетилхолина, что позволяет при моделировании процесса перейти к макроскопическому описанию.

Таким образом, данная модель предполагает, что синхронное активирование ацетилхолином достаточно большой зоны рецепторной популяции является управляющим элементом для фазового перехода типа "расслоение — растворение" субъединиц рецептора. Эволюционно необходимость в таком фазовом переходе диктуется помехоустойчивым поведением типа "все или ничего" и высокой чувствительностью к управляющим параметрам — присутствию ацетилхолина и ионов.

О механизме выделения и удаления медиатора корошо известно.
Значительно меньшую роль обично отводят второму параметру, определяющему, по нашему мнению, время релаксации откритой конформации рецепторов в нативных условиях. Существенно, что метод молекулярной динамики предсказывает затруднения движению ионов в направлении, перпендикулярном поверхности, структурирующей воду [6].
Таким образом, если подвижность одновалентных катионов вблизи
устья канала в фазе "растворения" становится анизотропной, то откритие канала должно приводить на какое-то время к локальному обеднению концентрации ионов маторова в свою очередь, приводит к
увеличению белок-белкового взаимодействия [7], т.е. в рассматриваемой модели приводит к понижению растворимости субъединиц рецептора "расслоению", происходящему со скоростью, пропорциональной ка

Образование структурно упорядоченной "измененной" воды — процесс кооперативний. Кинетическое действие процесса таково, что повышение концентрации и активированных рецепторов ускоряет дальнейшую диссоциацию лки. Эта положительная обратная связь за счет изменения полярных свойств среды учитывается в модели путем нелинейного представления коэффициента скорости и для описания комплекса ацетилхолин — рецептор от концентрации и Для описания такого эффекта раскладиваем к в ряд Тейлора по и :

$$k_3 = k_{30} + k_{31} + k_{32} + 0(x^3)$$
.

Поскольку скорость диссоциации комплекса возрастает с увеличением концентрации I, то величины k_{30} , k_{31} , k_{32} положительны. Подставив k_3 в (1), (2) и сложив их, получим дифференциальное уравнение для z=x+y:

$$z = dk_1 r_0 - (dk_1 + k_1)z - (k_2 - dk_3 - k_1)x$$
 (3)

Введение переменной χ позволяет исследовать поведение системы (1) и (2) в адиабатическом приближении [8]. При этом, согласню принципу подчинения, удается выразить y через x:

$$y = \frac{dk_1t_0 - k_2x}{dk_1 + k_{-1}}. (4)$$

Уравнение (4) применимо при условии

$$|x|_{max} \le \frac{dk_1 r_0 (dk_1 + k_{-1})}{dk_1 + k_{-1} - k_2} + (dk_1 + k_{-1}) x$$
.

Данное неравенство раскривает смысл адиабатического приближения. Ми требуем, чтоби величина x изменялась достаточно медленно по сравнению с постоянной затукания ($dk_1 + k_{-1}$) и вторим слагаемым первой части неравенства. Поскольку рассматривается случай виброса кванта ацетилколина, исходная величина d отлична от нуля. Это с учетом предельно високой исходной концентрации рецепторов r_0 , как и коэффициента скорости k_1 (обратно пропорционального r_1), доказывает выполнимость приведенного условия.

Подставив (4) в уравнение (2), получим

$$\dot{x} = k_{30}r_{0} \frac{dk_{1}}{dk_{1} + k_{-1}} + \left(\frac{k_{31}r_{0} dk_{1} - k_{30}k_{2}}{dk_{1} + k_{-1}} - k_{2}\right) x + \left(\frac{k_{32}r_{0} dk_{1} - k_{31}k_{2}}{dk_{1} + k_{-1}}\right) x^{2} + \frac{k_{32}k_{2}}{dk_{1}} x^{3}.$$
(5)

Существует аналогия между описанием термодинамических свойств бинарной жидкости в критической точке и фазовым переходом 2-го рода 2. Исходя из этого уравнение (5) должно описывать переход типа "все или ничего" при существовании единственного значения $d = d_c$, причем правая часть уравнения, т.е. критическая линия фазового перехода, должна иметь три корня, совпадающих в точке неустойчивости d_c . Этому случаю соответствуют следующие ограничения на параметри:

 $P \left| d = d_{c} = -\frac{7}{3} \left(\frac{k_{32} T_{0} dk_{1} - k_{31} k_{2}}{k_{32} k_{2}} \frac{dk_{1}}{dk_{1} + k_{-1}} \right)^{2} \frac{dk_{1} (k_{31} T_{0} - k_{2}) - k_{30} k_{2} - k_{2} k_{-1}}{k_{32} k_{2}} \frac{dk_{1}}{dk_{1} + k_{-1}} = 0;$

$$q\Big|_{d=d_{c}} = \frac{1}{27} \left(\frac{k_{32} r_{0} dk_{1} - k_{31} k_{2}}{k_{32}} \frac{dk_{1}}{dk_{1} + k_{-1}} \right)^{3} \frac{k_{30} r_{0} \left(dk_{1} \right)^{2}}{k_{32} k_{2} \left(dk_{1} + k_{-1} \right)} = 0.$$

При этих отраничениях стационарное решение уравнения (5) в точке $d = d_0$ имеет вид

$$x_{c} = \frac{1}{3} \frac{d_{c}k_{1}k_{32}k_{3} - k_{31}k_{2}}{k_{32}k_{2}} \frac{dk_{1}}{dk_{1} + k_{-1}}$$

Далее аналогично подходу, использованному в работе [70] при описании взаимодействия фармакологических веществ с рецепторной популяцией, критическое поведение системы выражается через отклонение от стационарного значения— параметр порядка [7] = 1 — 10. С помощью параметра порядка можно дать единое описание кинетики процессов при фазовых переходах как своеобразного броуновского движения. При этом аналогом броуновских частиц выступает термодинамическая функция 1, ответственная за фазовый переход. По физическому смыслу параметр порядка— это корреляционная функция, определяющая степень дальнего порядка в системе.

Запишем уравнение для отклонения 🔏 в следующем виде:

$$\dot{\overline{x}} = F(x_c) + \frac{\partial F(x_c)}{\partial x} \, \overline{x} + \frac{1}{2!} \, \frac{\partial^2 F(x_c)}{\partial x^2} \, \overline{x}^2 + \frac{1}{3!} \, \frac{\partial^3 F(x_c)}{\partial x^3} \, \overline{x}^3, \tag{6}$$

где $\mathcal{E}(x)$ правая часть уравнения (5); $\mathcal{E}(x_0) = 0$;

$$\frac{\partial F(x_C)}{\partial x} = \frac{dk_1(k_{31}r_0 - k_2)^{-k_{30}k_2 - k_2k_{-1}}}{dk_1 + k_{-1}} + \frac{1}{3} \frac{(dk_1k_{32}r_0 - k_{31}k_2)^2 dk_1}{k_{32}k_2(dk_1 + k_{-1})^2} = -p \frac{k_{32}k_2}{dk_1};$$

$$\frac{\partial^2 F(x_C)}{\partial x^2} = 0; \qquad \frac{\partial^3 F(x_C)}{\partial x^3} = 6 \frac{k_{32}k_2}{dk_1}$$

Из анализа на устойчивость решения уравнения (6) по линейному приближению видно, что потеря устойчивости происходит при достижении $d = d_C$, где $\frac{\partial F(x_C)}{\partial x}\Big|_{d=d_C} \rho(d_c) = 0$. Тогда при d, находящемся волизи d_C , оторасывая члены более высокого порядка по $d-d_C$, имеем

$$\frac{\partial F(x_c)}{\partial x} \approx \frac{\partial^2 F(x_c)}{\partial x \, \partial d} \, (d - d_0) = \left[\frac{k_1 \, k_1 \, k_3 \, k_7 \, k_5 \, k_2 \, k_7}{(d_c \, k_1 + k_{-1})^2} + \frac{d_c \, k_1 \, k_3 \, k_7 \, k_4 \, k_5}{(d_c \, k_1 + k_{-1})^3} \right] (d - d_0) = f(k_{i,j}, r_0, d_c) (d - d_0).$$

Затем уравнение (6) можно переписать в виде

$$\dot{\bar{x}} = f(k_{i,j}, r_0, d_c)(d - d_c)\bar{x} - \frac{k_{32}k_2}{dk_1}\bar{x}^3. \tag{7}$$

Из уравнения (7) видно, что при $d < d_c$, I = 0 — устойчивое решение, а при $d > d_c$ $\bar{x} = \left[\frac{f(k_{i,j}, r_o, d_c)(d - d_c)d_ck_i}{k_{32}k_2}\right]^{1/2}.$

Следовательно, для получения взрывной реакции типа перехода "все или ничего" необходимо незначительное удельное изменение концентрации ацетилходина относительно критической. Таким образом,
обеспечивается активация около 2000 рецепторов за 300 мкс при кратковременном выбросе кванта ацетилходина.

Изучение взаимодействия вещества с колинорецепторами затруднено отсутствием линейной зависимости между концентрацией активного комплекса, определяемого по величине эффекта, и величиной эффекта. Для агонистов только в узком диапазоне концентраций сохраняется пропорциональная зависимость между эффектом и количеством
агонист-рецепторных комплексов. Для конкретного экспериментального подтверждения критического типа поведения необходимо систематическое изучение окрестности излома кривых доза — эффект и изменение исходной модели при интерпретации результатов исследований
шума мембранного потенциала. В то же время сам ход этих кривых,
имеющих, как известно, сигмондальную форму, уже указывает на кооперативность процесса. Еще более убедительными подтверждениями кооперативного взаимодействия рецепторной популяции являются
такого рода факти, когда одна молекула налорфина "внводит из
строя" десятки молекул морфия.

Данний подход позволяет объяснить не только механизм такой эффективности путем дальнодействующего изменения структуры воды и констант диссоциации для агонистов и антагонистов, но и принципи пи первичной рецепции слабых физических полей.

Дальнейшее обсуждение роли кооперации и флуктуаций в рецепции поля опирается на универсальное описание термодинамических свойств вблизи фазових переходов 2-го рода. В качестве примера рассмотрим взаимодействие электромагнитного излучения (ЭМИ) с рецепторной популяцией. В этом случае изменяемая в процессе расслоения — растворения структура поверхностной воды может играть важную роль в качестве диспергирующей среды в следующей цепочке собитий.

Первичным микроскопическим эффектом при фазовом переходе водно-белковой матрицы (в отличие от льдоподобной структуры) является скачок дипольного момента в структурных элементах клатратной воды. Кооперативность процессов в зоне, активированной квантом ацетилхолина, будет приводить к макроскопически синфазному реаги-82 рованию на внешнее воздействие. Можно ожидать, что суммарный пипольный момент M окажется пропорциональным квалрату радиуса ρ активированной зоны. Кроме того, изменение диэлектрической проницаемости активированной зоны в процессе связывания волы ответственно за появление локальных градиентов 🗜 тангенциальной электрической составляющей ЭМИ. Локальные концентрации поля могут достигать нескольких порядков на частотах, превышающих частоту дебаевской релаксации связанной воды. При этом не может сформироваться сколь-нибудь значительний нагрев из-за преобладания теплоотдачи в окружающую среду. Это справедливо и для окрестности критической точки, так как в ней теплопроводность остается неизменной или даже возрастает /9/. Реальностью остаются только весьма високие градиенты поля на границах зон. Нетрудно показать (117, что градиент Е также пропорционален ог. Наличие суммарного дипольного момента и локального градиента поля является, согласно классическим представлениям, причиной возникновения втягивающей сили #~ МРЕ. Поскольку корредиция охватывает ~ 1000 рецепторов. размер активированной зони не менее чем в 1000 раз превышает эффективный размер 🚜 случайно оккупированного рецептора. Таким образом, по сравнению с некоррелированным возбуждением рецепторов кратковременный выброс и удаление кванта ацетилхолина должны сопровождаться возрастанием и последующей релаксацией индушированной полем втягивающей силн. Она растет как $(\rho/\rho_a)^4$, повыша ясь в указанных условиях на шесть порядков. Время релаксации 🐔 по сравнению со средним временем жизни возбужденного единичного рецептора в классическом приближении должно возрастать пропорционально объему, т.е. для плоской модели как $(\rho/\rho_0)^2$. Однако, как уже указывалось, т-к, ограничивается локальным обеднением концентрации Ма т и характеризуется значением от единиц до десятков миллисекунд.

Втягивающая сила должна визивать латеральную диффузию ективированной зоны, если только данный процесс не ослабляется известным уменьшением коэффициента диффузии В вблизи критической точки. Например, для диффузионного потока, вызванного только градиентом концентрации, как правило, наблюдается аномальное замедление, пропорциональное В. Однако для потока, вызванного градиентом давления ГР, ситуация диаметрально противоположная. Бародиффузионный поток равен произведению В, ГР и кинетического сингулярного коэффициента С/97. Произведение СВ пропорционально критическому радиусу корреляции Р с показателем степени Р от 1 (классическая теория) до 3/4 (плоская модель Изинга).

Формально радиус корреляции (а соответственно и диффузионный поток) стремится к \sim при приближении к критической точке ($d \sim d_c$). В реальных системах ограничения накладывают их характерные размеры - в нашем случае радиус о зоны, активированной квантом ацетилхолина. Согласно принципу масштабной инвариантности при все кинетические характеристики перенормируются заменой 🍌 на р.

Следовательно, характер синтулярности рассматриваемого явления в целом описывается таким образом. Учитывая, что РР~ Г~ рч $LD \sim \rho^2$, искомый бародий узионный поток расходится как $(\rho/\rho_0)^{44}\ell$. Полученная оценка указывает на аномальное возрастание индупрованной внешним полем кинетической подвижности активированных зон. При определенных условиях возможна их латеральная диййузия путем последовательной кооперативной перестройки водно-белковой матрины по градиенту поля.

Рассмотренный эффект аномального возрастания восприимчивости системы при ее активации квантами ацетилхолина потенциально может быть ответственным за следующие события:

- 1. Индушированное слияние с активированной зоной мелкомасштабных, короткоживущих, но возникающих с большей вероятностью флуктуаций параметра порядка водно-белковой матрицы. Результат такого процесса - рост времени релаксации и, следовательно, изменение параметров миниатюрного потенциала концевой пластинки (МПКП).
- 2. Изменение карактеристик мембранного шума при малых концентрациях ацетилхолина в синаптической щели за счет нарушения статистически независимого процесса открывания одиночных каналов (подтверждено экспериментально).
- 3. "Размитие" активированной зоны в направлении градиента внешней, тангенциальной к плоскости мембраны Е- компоненты пол Результат - изменение параметров МПКП.

Любое из указанных собитий биологически значимо и может интерпретироваться как конечное звено первичной реценции полн.

Таким образом, на примере ацетилхолин-рецепторного комплекса показан возможный механизм работы синапса как неравновесной системы, восприимчивой к влиянию внешних полей.

Специфика взаимодействия подобных неравновесных сред с полями заслуживает, на наш взгляд, дальнейшего изучения.

- Т. Притожин И., Стенгерс И. Норядок из хаоса. М.: Прогресс,
- 1. пригожин и., стенгерс и. норядок из хаоса. м.. прогресс, 1986. 100 с.
 2. Клотц И.М. Вода. // Горизонтн биохимии. М.: Наука, 1964. С. 399—410.
 3. Сергеев П.В., Шимановский М.Л. Рецепторы физиологически активных веществ. М.: Медицина, 4987. 100 с.
 4. Кяйвяряйнен А.И. Динамическое поведение белков в водной среде и их функции. Л.: Наука, 1980. 100 с.

5. Габуда С.П. Связанная вода. Факти и гипотези. — Новосибирск: Наука, 1982. — 100 с.
6. Антонченко В.Я. Физика води. — Киев: Наук.думка, 1986. — 100 с.
7. Основы биохимии: В 2 кн. / А.Уайт, Ф.Хендлер, Э.Смит и др. — М.: Мир, 1981. — Кн. 4. — 100 с.
8. Хакен Т. Синергетика. — М.: Мир, 1980. — 100 с.
9. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
10. Зеезе А., Магер П.Н. Простые системы с обратной связью, используемые для моделирования взаимодействия лекарств с рецепторами // Термодинамика и регуляция биологических процессов. — М.: Наука, 1984. — С. 125—135.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. — 100 с.

УДК 537.868.536:577.3.08

А. Г. Ординец

АБСОРБІДЮННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Проблема изучения эффектов резонансного взаимолействия биообъектов с электромагнитным излучением (ЭМИ) на клеточном и более высоком уровнях организации носит фундаментальный характер /1/. Поиск частотных особенностей в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн на этих уровнях проводился лишь косвенно путем регистрации физиологического отклика /2-47. В силу принципиального отсутствия жесткой детерминации таких откликов с параметрами внешних излучений низкой энергии более предпочтительно обнаружение дисперсии первичных физико-химических эффектов іп Vivo. Существующими физическими методами заретистрировать обнаруженные частотные особенности пока не удается /37. Связано это, по-видимому, с тем, что использовавшие ся системы регистрации в условиях эксперимента облапают разрешающей способностью порядка 1 % поглощенной мощности на преобладающем "неселективном" фоне поглощения молекулами воды.

Для выяснения первичных селективных механизмов рецепции ЭМИ биообъектами необходима разработка новых абсорбимонных спектральных методов. Цель данной работы - разработка метода, отвечающего следующим требованиям: достаточно высокая чувствительность; непосредственное определение фисперсии локально поглощаемой части мощности на преобладающем на несколько порядков неселективном фоне: неразрушающий и невоздействующий на функциональное состояние исолодуемого биробъекта принцип съема информации: широкополосность (всеволновость).

В основу метода положена регистрация с помощью оптико-акустической (ОА) камеры локальных тепловых процессов, сопровождающих. как будет показано ниже, взаимодействие частотно-модулированного

(ЧМ) излучения со спектрально-неоднородной средой. Теория подобного эффекта для амплитудно-модулированного (АМ) излучения развита в работе Розенцвейга и Герша f57. В рассматриваемом случае подход данных авторов следует дополнить учетом свойства дисперсной среди преобразовивать ЧМ в АМ излучение. Рассмотрим это более подробно в приближении A1 — девиация частоти; f — полуширина резонансной кривой поглощения). Предполагая закон изменения несущей частоти ЭМИ в виде $\omega = \bar{\omega} + a$ 1 интенсивность излучения, распространяющегося в анализируемой среде, можно представить в виде

$$J(s,\omega,t)=J(s,\overline{\omega})+\frac{\partial J(s,\omega)}{\partial \omega}\bigg|_{\omega=\overline{\omega}} \Delta \delta \sin \mathcal{L}t + \frac{1}{z}\frac{\partial^2 J(s,\omega)}{\partial \omega^2}\bigg|_{\omega=\overline{\omega}} \Delta \delta^2 \sin^2 \mathcal{L}t + \cdots, \tag{1}$$

где у - координата, отсчитиваемая в отрищательную полуплоскость от поверхности исследуемой среды.

Выделяя в результирующем ОА сигнале только первую гармонику частоти модуляции \mathcal{P} и учитыван экспоненциальную зависимость $J(x,\omega) = J_0 \exp(\beta x)$, где $\beta = \beta_0 + \beta_1(\omega)$, β_0 , $\beta_1(\omega)$ — коэффициенты затужания слабодисперсной части среды (воды) и спектрально-неоднородного включения, для плотности мощности тепловых источников имеем

$$W(x,\omega,t) = \beta x J_0 \frac{\partial \beta_1(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \overline{\omega}} exp(\beta x) \text{ sin } \mathfrak{D}^t.$$
 (2)

Подставив (2) в уравнение тепловой диффузии и решив его при тех же предположениях, что и в работе /5/, для амплитуды ОА сигнала получим

$$\begin{aligned}
& R = \frac{T_{0}^{p} \beta_{0}^{J} \delta_{0}}{\sqrt{2} i_{g} a_{g} \tilde{l}_{0} k_{s} (\sigma^{2} - \beta^{2})} \\
& \chi \left\{ \frac{(b+1) \left(\frac{1-r}{1+r} \right) exp(\sigma_{g}^{2}) - (b-1) \left(\frac{7+r}{1-r} \right) exp(-\sigma_{g}^{2})}{(g+1)(b+1) exp(\sigma_{g}^{2}) - (g-1)(b-1) exp(-\sigma_{g}^{2})} \right. \\
& \left. \frac{2 \left[\frac{2\delta r}{1-r^{2}} - \frac{1+r^{2}}{1-r} + 2\sigma_{g}^{2} (r-b) \right] exp(-\beta^{2})}{(g+1)(b+1) exp(\sigma_{g}^{2}) - (g-1)(b-1) exp(-\sigma_{g}^{2})} \right. \\
& + \frac{(3)}{(g+1)(b+1) exp(\sigma_{g}^{2}) - (g-1)(b-1) exp(-\sigma_{g}^{2})}{(g+1)(b+1) exp(\sigma_{g}^{2}) - (g-1)(b-1) exp(-\sigma_{g}^{2})} \right] .
\end{aligned}$$

Здесь $\gamma = \ell_p / \ell_V$ — отношение теплоемкостей для газа, заполняющего ОА камеру; ℓ_0 и ℓ_0 — давление и температура газа; ℓ_0 — толщи—

на слоя газа; ρ_i , ℓ_i , ℓ_i — плотность, теплоемкость, коэффици— ент теплопроводности (l принимает значения: S — параметры образиа; g — газа; b — подложки); l — толщина ооразиа; $a_i = \left(\frac{\rho_i \ell_i \cdot g_i}{2\ell_i}\right)^{1/2}$ коэффициент термической диффузии среды i; $G_S = (1+i) a_S$, i — мни— мая единица; $b = \frac{k_b a_b}{k_S}$, $g = \frac{\ell_g a_g}{\ell_S}$; $f = (1-j) \frac{\beta}{2a_S} = \frac{\beta}{G_S}$.

Если в качестве образца выбирается биообъект *in vivo*, "подложка" отсутствует, следовательно, $b \equiv 1$. Учитывая также, что обычно $g < 10^{-2}$, а $6_3 t \gg 1$, из (3) получаем более простое и удобное выражение для амплитуды ОА сигнала:

$$Q = \frac{\partial P_0 \beta J_0 \Delta V}{\sqrt{2} I_0 a_0 T_0 k_S G_S (G_S + \beta)^2} \frac{\partial \beta_T(\omega)}{\partial \omega} \bigg|_{\omega = \bar{\omega}}$$
(4)

Анализ выражения (4) позволяет раскрыть ряд особенностей метода.

Пропорциональность виходного сигнала интенсивности ЭМИ ха-

рактеризует линейность метопа в большом пинамическом диапазоне и "нулевой" принцип измерений. Другими словами, если анализируемая среда не обладает писперсией и отсутствует перазитная амилитудная модуляция на первой гармонике, то амплитуда ОА сигнала тождественно равна нулю. Изменение фазн ОА сигнала на 🚜 (знака $\frac{\partial \beta_1(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \bar{\omega}}$) при смещении рабочей точки с одного склона резонансной кривой на пругой может служить надежным критерием при изучении резонансных эффектов на преобладающем фоне неселективного или монотонно зависящего от частоты поглощения. Степень "контрастирования" сигнала пропорциональна крутизне частотной зависимости коэффициента затухания β и для "добротностей" $\sim 10^4$ /6/ может давать соответствующий внигрыш по сравнению со слабой дисперсией гомогенной воды. Изменение характера зависимости выходного сигнала как функции частоти модуляции \mathscr{P} от \mathscr{P}^{-1} до \mathscr{P}^{-2} при изменении знака неравенства между глубиной проникновения излучения и длиной тепловой диффузии a_c^{-1} (в пределах которой формируется ОА сигнал) позволяет дополнительно по сравнению с /7/ повысить точность измерения.

С использованием частот модуляции от 10^{-1} до 10^2 Гц можно при наличии дисперсии поглощения в анализируемых задачах получить информацию о физических характеристиках слоев биосреды, прилегающих к поверхности облучения на расстоянии от 10^{-4} до 1 мм.

Выходной ситнал слабо зависит от абсолютного значения несущей частоты при условии $\beta_0 \gg \beta_1(\omega)$ (всеволновость) и определяется только расстройкой и величиной Γ , характеризующими крутизну $\frac{\partial \beta_1(\omega)}{\partial \omega}$

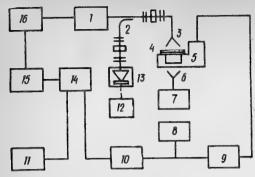


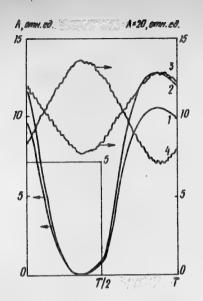
Рис. 1. Блок-скема измерительной установки: 6 - рупорная антенна; 8, 12 - осциллографи; 9 - предварительный усилитель; 10 - усилитель мощности; 16 - модулятор

Определенным ограничением возможностей метопа на первой рармонике является то, что при использовании стандартных генераторов частотную модуляцию, как правило. сопровожнает паразитная амплитудная модуляция. Последняя приводит к наличию фонового сигнала, так как вызывает ОА эффект даже в неселективных, поглощающих средах. Кроме чисто аппаратурных способов устранения вклада паразитной амплитудной модуляции существует и более принципиальный путь использование гармоническо-

го закона модуляции и виделение не первой, а второй гармоники ОА сигнала. Несмотря на некоторое снижение полезного сигнала ($\sim \frac{2}{F}$) причем для лоренцовской формы контура поглощения $\left(\frac{2}{F}\right)_{opt} \approx \frac{3}{3} \left[\frac{8}{2}\right]$), происходит дополнительное повищение "контрастности" вклада "резонансов" по отношению к слабодисперсному фону. Наиболее существенным преимуществом является отсутствие в спектре боковых частот паразитной амплитудной модуляции гармоник $\mathscr P$, что позволяет реализовать предельную чувствительность метода, ограничиваемую в этом случае лишь собственным шумом ОА камеры и предусилителем.

Оценки "контрастности" метода по первой и второй гармоникам можно получить, сравнив $\frac{\partial s(\omega)}{\partial \omega}\Big|_{\omega=\overline{\omega}}$ и $\frac{\partial^2 s(\omega)}{\partial \omega^2}\Big|_{\omega=\overline{\omega}}$ для дисперсионной кривой воды в мм диапазоне длин волн и лоренцовского контура с добротностью 10^3-10^4 . При этом для первой гармоники значение "контрастности" составляет $3\cdot 10^2-3\cdot 10^3$, а для второй -10^5-10^7 .

Экспериментальная проверка основних идей проводилась с помощью измерительной установки (рис.1). Излучение от генератора 1
(КВЧ Г4-156), модулированное по частоте, через рупорную антенну
3 направлялось на объект 4, представляющий собой тонкую (* <<
200 мкм) стеклянную кювету, заполненную дистиллированной водой.
ОА сигнал, возникающий в воде, передавался через термически тонкое входное окно в камеру ОА датчика 5 собственной конструкции и
приводил к колебаниям в ней давления газа с частотами, кратными
частоте модуляции. Выходной сигнал чувствительного микрофона регистрировался с помощью многоканального анализатора 15 (ММ =1024)



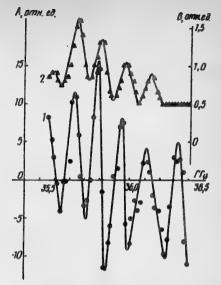


Рис. 2. Изменение амплитулы сигнала за период модуляции (F = 1 Гц; P = 3 мВт — мощность падающего излучения): 1 - AM, F = 35,84 ГТц; 2 - AM, F = 35,78 ГТц; 3 - 4M, 4 - 4, 5 мПц, 5 - 4, 5

Рис.3. Зависимость амплитулы ОА сигнала (1) и величини отраженной мощности (2) от частоты ЭМИ при ЧМ: $\mathcal{L} = 1$ Гц; $\mathcal{L} = 3.5-5$ МГц; $\mathcal{L} = 5$ мВт

и фиксировался на самописце 11. Управление установкой осуществлялось от микро-ЭВМ 666 В (14).Вели-

чины прошедшей мощности контролировались с помощью измерителя ? плотности потока мощности ПЗ-9, а отраженный сигнал - с помощью направленного ответвителя 2 и детекторной секции.

Характерный вид кривых ОА сигнала за один период приведен на рис. 2. Зависимости и и 2 соответствуют случаю АМ, 3 и 4 — ЧМ в масштабе 20:1.

На рис. З представлена частотная зависимость амплитуды ОА сигнала в режиме ЧМ. Выходная мощность генератора < 5 мВт, частота модуляции — 1 Гц, девиация несущей частоты — 3,5-5 мГц. Вклад паразитной АМ устранялся путем вычитания ОА сигналов, полученых при использовании согласующей диалектрической пластинки (на наружной поверхности воды) и без нее. Основная составляющая погрешности измерений определялась неточностью установки несущей частоты генератора. Отрицательное значение амплитуд на кривой 1 рис. 3 соответствует сдвигу фази ОА сигнала «, кривая 2 иллюстрирует синхронное

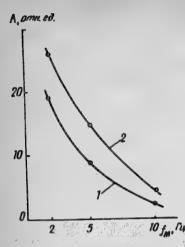


Рис. 4. Амплитуда ОА сигнала в функции частотн моду-P = 1 мВт; F = 22 ПТц; 1 - нормальный эмплермис; 2 увлажненный эпидермис

изменение отраженной мощности; регистрируемое в частотном диазазоне, оптимальном для конкретного направленного ответвителя.

Экстремумы на кривой 1 отвечают точкам максимальной крутизны резонансной кривой. Определяя расстояние между ними, можно найти среднюю по ансамолю добротность (≈400). Наличие эквипистантных резонансов свидетельствует об образовании стоячей волны в волноводном тракте между киветой с водой и генератором. Благодаря большому продольному индексу повышается критичность к набегу фазы при изменении частоты, что является причиной полученного довольно высокого значения добротности.

Можно спелать два вивода. Во-первых, разрешающая способность измерений селективного поглощения на сла-

боселективном фоне была в данном эксперименте ~10-3, что само по се бе является новим результатом. При использовании данного метода к задачам идентирикации "резонансов" с добротностью, близкой к 104, разрешающая способность конкретной установки автоматически удучшается еще на порядок. Во-вторых, обнаружение по физиологическому отклику резонансов, подобных представленным выше, может служить источником ряда ошибочных утверждений. Поэтому представленный метод является метрологической перспективой при отделении артефактов в задачах исследования локального резонансного взаимодействия ЭМИ с организмами.

Применимость метода к исследованию поглощения и кіко подтверждается экспериментом (рис. 4). Здесь зависимости амплитуды ОА сигнала при АМ сняти в функции частоти модуляции 🦠 🛵 для двух случаев: 1 - кожа человека в нормальных условиях; 2 - кожа человека в течение 5 мин находилась в контакте с водой и затем насухо вытиралась. Отношение амилитуд для соответствующих 🖍 показывает, что при высоких частотах (малых глубинах анализируемого слоя) оно одинаково и равно 1.67. а при низких частотах уменьшается до 1.37. Это сридетельствует о возможности регистрации профиля распределения воды в коже.

1. Tröhlich H. The biological effects of microwaves and related questions // Adv. Electron, and Electron Phis. - 1980. - 53.-P. 85-102.

Андреев Е.А., Белий М.У., Ситько С.П. Реакция организма чело-

андреев Е.А., Белни М.У., Ситько С.П. Реакция организма человека на электромагнитное излучение миллиметрового диапазона// Вестн. АН СССР. — 1985. — № 1. — С. 24—32.

3. Физические основы микроволновой (биорезонансной) коррекции бизиологического состояния организма человека / Е.А. Андреев, М.У.Белый, В.А.Куценюк и др. // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Певяткова. — М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. — С. 58—85.

4. Резонансный характер воздействия радиоволн миллиметрового диапазона на биологические системы / Л.А.Севастьянова, А.Г.Бородкина, Э.С.Зубенкова // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Л.Девяткова. — М., 1983. — С. 34—47.

6. Rosencwaig A., Gersho A. Theory of the photoacoustic effect with solids // J. Appl. Phys. — 1976. — 47.N 1.— P. 64—69.

7. Голант М.Б. Биологические и физические факторы, обусловливающие влияние монохроматических электроматнитных излучений мидлиметрового диапазона малой мощности на жизнедеятельность // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в сиологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М., 1985. -C. 21-36.

7. Винокуров С.А. Определение оптических и теплофизических кара-ктеристик конденсированных сред оптико-акустическим методом/ ж. прикл. спектроскопии. - 1985. - 42, вып. 1. - С. 5-16. 8. Перегуд Е.А., Горелик Д.О. Инструментальные методы контроля загрязнения атмосферы. - Л.: Химия, 1981. - 384 с.

УЛК 615.47:537.811:616.3

В. И. Соломонов, О. И. Писанко, А. Е. Мо сежный, Г. И. Кириченко, В.П. Туранский

ВЛИННИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВЧ ДИАПАЗОНА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЖНЫХ ПОКРОВОВ

Оптические характеристики кожных покровов, в частности спектр поглощения, применяются для оценки периферического кровотока. Известны работы /1/ по определению концентрации гемоглобина в различных биологических тканях, таких, как кожные покровы, слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта, ткань печени. Содержание гемоглобина в поврежденных живых тканях коррелирует с кровотоком и по вволяет количественно оценить степень кровонаполнения. Вместе с ім в механизме биологической реакции в результате различних возействий происходят изменения периферического кровотока. Поэтому метод прихизненной спектрометрии кожных покровов применен нами для уточнения характера направленного действия низкоинтенсивного (<10 мВт/см²) электромагнитного излучения (ЭМИ) КВЧ диапазона на оиологически активные точки (БАТ).

В последние годы низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ диапазона широко

применяется как в медико-биологических исследованиях, так и в практическом здравоохранении [2]. В работах [3, 4] показано, что излучение КВЧ диапазона действует на организм человека через БАТ, которые обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиями и регулируют вегетативные реакции организма. Однако до сих поростается неясным характер взаимодействия ЭМИ КВЧ диапазона с БАТ.

Цель настоящей работы — уточнение карактера изменений оптических свойств кожного покрова в зоне БАТ под действием низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ пиапазона.

Для исследований была отобрана группа добровольнев (20 практически здоровых мужчин). Средний возраст испытуемых 29 лет. Исследования проводились с утра, натощак, в одно и то же время.

Методика эксперимента следующая. У испытуемого регистрировали спектр поглощения кожи в зоне БАТ в течение 10 мин. После этого осуществлялось воздействие ЭМИ на фиксированной длине волны порядка 5,6 мм с уровнем выходной мощности 2—3 мВт/см² на БАТ-СL4 ("XE-IУ") в течение 10 мин с одновременной регистрацией спектра поглощения в зоне левой или правой точки "XЭ-IУ". По окончании воздействия ЭМИ на БАТ спектры поглощения регистрировались с зоны правой или левой точки в течение 10 мин.

В качестве источника низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона применялся экспериментальный образец аппарата "Электроника КВЧ-ОІ" [5], обеспечивающий: работу на фиксированной длине волны ЭМИ — 5,6 мм; уровень мощности ЭМИ на выходе излучателя — 5 мВт; режим генерации — непрерывный; вид излучателя — диэлектрическая штыревая антенна.

Спектр поглощения в зоне БАТ получали на аппаратуре по методике, изложенной в работе /6/. На рис.1 приведены спектры поглощения, снятые с зоны левой БАТ "ХЭ-ГУ" при воздействии низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на симметричную правую БАТ "ХЭ-ГУ". Из рисунка видно, что при воздействии излучения на правую БАТ в зоне левой БАТ отмечается снижение поглощения в широкой области спектра с выраженным на 9,6±1,5 % максимумом на длине волны 610 нм.

На рис. 2 представлены спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ "ХЗ-ІУ" при воздействии ЭМИ КВЧ диапазона на эту же точку. Видно, что под воздействием излучения в точке "ХЭ-ІУ" происходит увеличение поглощения в широкой области спектра с максимумом 26,9± ± 1,5 % на длине волны 610 нм.

На рис. 3 приведены спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ "ХЭ-IV", на которую был сориентирован излучатель аппарата "Электроника КВЧ", но излучение на его выходе отсутствовало. Как видно из рисунка, спектры поглощения оставались неизменными в процессе всего эксперимента.

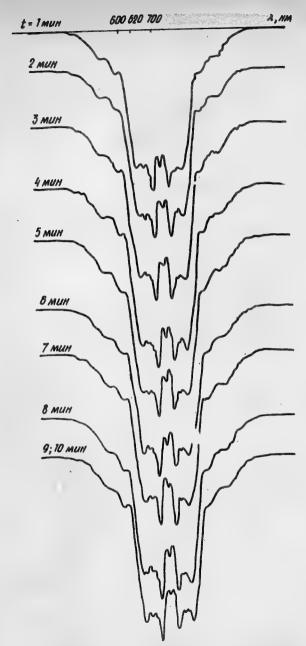


Рис. I. Спектры поглошения, снятые с зоны левой БАТ

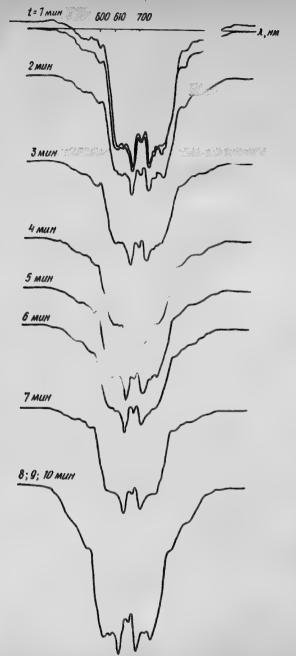


Рис. 2. Спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ

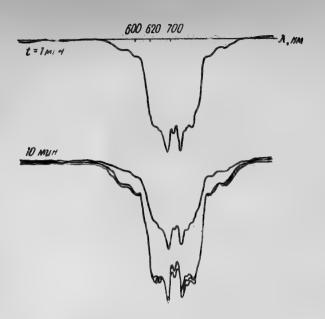


Рис.3. Спектри поглощения, снятие с зони пра-BOM BAT

На основании полученных данных можно сделать предварительный вывод о том, что воздействие низ интенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на БАТ вызывает непосредственно в зоне воздействия и в симметричной ей точке изменения оптических характеристик кожного покрова.

Предложенная методика может быть использована для контроля за воздействием ЭМИ КВЧ длапазона на живые организмы.

Биофизика / Ю.А.Владимиров, Д.И.Ратуркин, А.Я.Потапенко и др. — М.: Медицина, 1983. — 36 с.
 Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Поп реп. Н.Девяткова. — М.: Ин-т радиотех—ники и электрон. АН СССР, 1985. — 284 с.
 Андреев Е.А., Белий М.У., Ситько С.П. Реакция организма человека на электромагнитное излучение миллиметрового диапазона // Вестн. АН СССР. — 1985. — Вып. 1. — С. 24-32.
 Применение электромагнитного КВЧ-излучения низкой интенсивности для лечения неосложненной гастропуоденальной язем / Л.Г. Гассанов, В.А. Зелинский, О.И.Писанко и др. // Электрон, пром-сть. — 1987. — Вып. 1. — С. 31-33.
 Аппараты для микроволновой рефлексовиагностики и теранци. В дострания в для микроволновой рефлексовиагностики и теранци.

5. Аппараты для микроволновой рефлексодиагностики и терапии "Электроника-кВЧ" / А.Н.Балаба, П.Б.Толант, Л.С.Назарение и дт. //
Там же. - 9: 30-31.

6. Спектрофотометрия слизистой оболочки желудочно-кишечного прак-та / Г.Я. Кириченко, А.Е. Мосежний, В.И.Соломонов и др. // Акту-альные проблемы лечения больных заболеваниями толотой кишки: Тез. докл. конф. - делезноводск, 4986. 4 С.28.

УДК 615.47:537.811:616.3

В.И.Соломонов, О.И.Писанко, А.Е. Мосежный, Г.И.Кириченко, В.П. Туранский BILINHHUE HUSKOUHTEHCUBHOTO SJEKTPOMATHUTHOTO USJIYYEHUN KBY лиапазона на теплопролукцию эпигастральной области

Карактер ответных реакций в организме возникающих при воздействии на биологически активные точки (БАТ) низкоинтенсивным (<10мВт/см²) электромагнитным излучением (ЭМИ) КВЧ диапазона, остается еще неясным, котя по данному вопросу существует несколько версий /17.

С целью получения дополнительной информации о механизме воздействия ЭМИ КВЧ дианазона на человеческий организм нами был применен метод тепловизионного исследования кожного покрова передней бришной стенки при воздействии ЭМИ на БАТ, изложенный в /27.

Испытуемого укладывали на кушетку, где в течение 20 мин. он проходил тепловую адаптацию. После этого производились съем и запоминание тепловизионного изображения передней брюшной стенки. Пля тепловизионного контроля использовали отечественный цветной тепловизор "Радуга-МТ".

После указанных подготовительных процедур осуществляли в течение 40 мин воздействие низксинтенсивным ЭМИ КВЧ лиапазона на БАТ-ЕЗ6 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ"), расположенную в канале желудка. Выбор точки произведен не случайно, согласно /37, она отвечает за органи брюшной полости.

Источником низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона служил экспериментальный образец аппарата "Электроника КВЧ-ОА", имеющий следуриме характеристики [47: работа на фиксированной длине волны ЭМИ -5.6 мм: уровень мошности ЭМИ на выходе излучателя - 5 мВт; режим генерации - непрерывный; вид излучателя - диэлектрическая штыревая антенна.

Исследования проводились на группе (15 человек) здорових мужчин в возрасте 23-40 лет, изъявивших желание принять участие в эксперименте, с утра без учета индивидуального ритма состояния БАТ. Сравнение термограмм производилось как путем запоминания исходной термограммы (после тепловой адаптации в течение 20 мин) в цифровой памяти тепловизора и последующего сравнения с исследуемой, так и по фотографиям полученных термограмм.

В контрольной группе из пяти человек после тепловой апаптании (20 мин) излучатель аппарата "Электроника КВЧ" ориентировался на БАТ-ЕЗ6, имитировалась полная картина его работы, но излучение на выходе отсутствовало. На протяжении 10 мин также фиксировалась пинамика телевизионного изображения, снимаемого с области передней бришной стенки.

Результати исследований показали, что при воздействии низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на БАТ-ЕЗ6 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ") проискодят фазние температурные изменения в области эпигастрии. Так. на 2-3-й мин после начала воздействия отмечалось повышение кожной температурн на 0,4-0,6 $^{\circ}$ C (ρ <0,05) в области эпигастрии (3-4cm²). На 5-6-й мин повышалась на 0.4-0.8 °C (P< 0.05) кожная температура верхней половины живота. В контрольной группе при "кожном" воздействии ЭМИ на БАТ каких-либо существенных изменений в характере тепловизионной картины не обнаружено.

Таким образом, применение низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ пиапазона с целью воздействия в лечебных пелях на БАТ-ЕЗ6 ("ПЗУ-САНЬ-ЛИ") приводит к изменению теплопродукции в области эпигастрии и верхней половине живота. Это обусловлено, по-видимому, изменением трофики органов верхнего этажа оришной полости.

Тепловизионный метод может служить одним из способов объективизации контроля механизма взаимодействия низкоинтенсивных ЭМИ КВЧ диапазона с биологическими объектами.

Оффекти нетеплового воздействия миллиметрового излучения на ойологические объекти / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1983. — 220 с.
 Регистрация воздействия лазера на оиологически активные точки тепловизором / К.К.Табелко, Г.А.Падилко, В.И.Соломонов и др.// Тепловидение в медицине: Тез. докл. (Киев, 1984). — Киев, 1984. - С. ТА-Т2.
 Гераза Лирови. Тролиметрия объекта праводения проделжаться праводения проделжаться праводения проделжаться праводения проделжаться праводения праводения проделжаться праводения праводения проделжаться праводения праводения проделжаться праводения прав

3. Гаваа Лувсан. Традиционные и современные аспекты восточной рефилексотерации. — М.: Наука, 1986. — 576 с.
4. Основные направления создания аппаратуры для микроволновой рефилексодиагностики и терации / О.И. Писанко, Л.С. Назаренко, А.Н. Балаба и др. // Современные тенденции развития медицинского присоростроения: Тез. докл. Всесоюз. конф. — М., 1986. — С.27-28.

УДК 615.47.537.811:616.3

В. А. Зелинский. О. И. Писанко

HUSKOUHTEHCUBHOE SJEKTPOMATHUTHOE USLYYEHUE KBY JUAHASOHA В КОМІЛЕКСНОМ КУРОРТНОМ ЛЕЧЕНИИ ЯЗВЕННОЙ БОЛЕЗНИ

По статистическим данным разных стран, язвенной болезнью желудка и ввенавлатиперстной кишки странает 1-10 % населения /1-37. Високая заболеваемость, частые рецидивы, длительная нетрудоспособность поражение лин преимущественно молодого возраста, серьезные осложнения - все это относит язвенную болезны к самым актуальным проблемам современной гастроэнтерологии /4, 57.

При лечении извенной болезни вне стадии выраженного обострения на нервый план выступает применение различных курортных и физических факторов /6 - 87.

В последние годы появились единичые сообщения об успешном применении ниаксинтенсивного (< 10 мВт/см²) электромагнитного излучения (ЭМИ) КВЧ длапазона при лечении явренной болезни 29-117. Однако, на наш ввгляд, эти работы имеют существенный недостаток эффективность применения ЭМИ КВЧ длапазона не сравнивалась с эффективностью его включения в комплексную противоязвенную терапию с использованием других физических факторов, которые уже успешно применяются при лечении язвенной болезни. Следует также отметить, что в указанных работах отсутствуют сведения о влиянии ЭМИ на функциональное состояние желудка и двенадцатиперстной кишки.

<u> Нель настоящей работи</u> → изучение в сравнительном аспекте особенностей влияния низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона и его сочетание с гоязелечением на клиническое течение язвенной болезни, функинональное состояние желупка и пренациатиперстной кишки, процесси репарации в данных органах и на основании полученных данных разработка принципов дифференцированной курортной терапии больных навенной болезнью. В пропессе исследования изучали лечебный эффект низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона, а также его сочетания с пелоипотерацией. В качестве групп сравнения были взяты больные, получавшие терапию с применением ранее известных физических факторов: грязелечения и электропунктуры, а также их сочетаний. Все перечисленные физические факторы были включены в комплексное санаторно-курортное лечение больных язвенной болезныю, при этом всем папиентам назначали пийференцированный двигательный режим, климатотеранию, дисту № 1, кислородные ванны, питье минеральной волы "Оле сокая".

КВЧ терапию проводили по специально разработанной методике [12]. В начале исследований определяли индивидуальную для каждого пациента терапевтическую частоту ЭМИ путем постоянного контроля электроэнцефалограммы и одновременного воздействия на биологически активную точку (БАТ) ЕЗ6 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ") ЭМИ в интервале длин волн 5,6-3,8 мм. По изменению на электроэнцефалограмме бета-ритма на альфа-ритм, карактеризующему переход кортиальных элементов кори толовного мозга в спокойное состояние, что субъективно проявляется состоянием релаксации или сна, определяли индивидуальную терапевтическую частоту излучения.

Курс КВЧ терапии состоял из 40-45 процедур, проводимых ежепневно. Воздействие низкоинтенсивным ЭМИ осуществляли на индивидуальных для каждого больного терапевтических частотах на БАТ ЕЗ6 в течение 30 мин.

В качестве источника низкоинтенсивного ЭМИ применяли экспери-

ментальный образец аппарата "Электроника КВЧ" [13], обеспечивающий работу на заданной фиксированной частоте КВЧ диапазона при уровне выходной мощности не более 5 мВт.

Аппликационную пелоидотерацию проводили по митигированной методике: пелоид толщиной 3 см температурой 38 ос накладывали на область эпигастрия на 20 мин через день; воего на курс лечения 6 процедур.

Процедури электропунктури назначали ежедневно (на курс 12) и проводили их с помощью ашпарата "ЭЛАП-1" /14/, время воздействия на каждую сегментарную БАТ составляло 4 мин. При сочетании электропунктуры о грязелечением после каждого нечетного севнся электропунктуры (время воздействия сокращали до 2 мин) осуществляли аппликационную пелоидотерацию по митигированной методике /15/. При этом на курс лечения приходилось 12 процедур электропунктуры и 6 грязевых аппликаций.

Помимо тщательного опроса больных и данных объективных методов исследования были использованы такие методы диагностики, как рентгенологические и эндоскопические исследования пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки, методики рН-гастродуоденографии и дуоденотонографии. Указанные методы исследования были применены к больным при поступлении в оанаторий и после окончания курса лечения.

Было обследовано 350 больных язвенной болезныю желудка и двенадцатиперстной кишки в возрасте 30-60 лет (из них 90 % мужчин). Язвенной болезныю двенадцатиперстной кишки страдало 93 % обследованних. Заболевание у пациентов наблюдалось в различных стадиях течения: ремиссии — 8 %, нестойкие ремиссии — 50,5 %, затихающее обострение — 44,5 %. Длительность заболевания у 2/3 обследованных составляла 6 лет и более.

Все больные язвенной болезных в зависимости от метода комилексного санаторно-курортного лечения были подразделены на пять
групп. Формирование групп проводилось методом направленно-уравнительного отбора. Первая группа больных (68 человек) получала комплексное лечение с включением пелоидотерации (лечебный комплекс –
ЛК № 1), вторая (80) — лечение с включением электропунктуры (ЛК
№ 2), третья (72) — терапию с включением сочетания электропунктуры и грязелечения (ЛК № 3), четвертая (71) — лечение с включением КВЧ терапии (ЛК № 4) и пятая (59 человек) — терапию с использованием сочетания КВЧ терапии и грязелечения.

При поступлении в санаторий была внявлена следующая картина. Диспепсический синдром в той или иной степени был отмечен у большинства больных. Чаще всего пациенти жаловались на изжогу и отрыжку (62 и 51 % соответственно), а также на тошноту (19 %), периодическая рвота была у 9 % обследованных, ухудшение аппетита у Л %. Болевой синдром имел место у подавляющего большинства больных и, как правило, носил типичный для язвенной болезни жарактер. Жалобы на боли предъявляли 89 % больных, положительный симптом Менделя был отмечен у 67 %, болезненность в точке Боаса — у 46 %. Со стороны других органов чаще всего отмечалось нарушение функции кишечника преимущественно в виде запоров (23 %), некоторое увеличение и болезненность печени (9 %), расстройство сна (7%).

При поступлении в стационар гастродуоденофиороскопическое последование было выполнено у 184 больных, рентгенологическое исследование верхних отделов пищеварительного тракта — у 38. При этом, по рентгеноэндоскопическим данным, язвенный дефект был зафиксиро ван у 44 % обследованных.

Дуоденотонографическое исследование было сделано 25 больным, у большинства из ниж (88 %) зафиксирован гиперкинетический тип двигательной активности двенадиатиперстной кишки (до 80 %), увеличение периода работы кишки, повышение частоты и амплитуды ее сокращений.

Исследование уровня кислотообразования в желудке и ощелачивания в двенадцатиперстной кишке было проведено у 200 больных. При этом уровень рН в корпусном отделе желудка составлял 1,5-0,04, в антральном отделе нейтрализации кислого желудочного содержимого практически не наолодали и рН повисилась незначительно - до 4,7+ + 0,06. В силу этого кислое желудочное содержимое поступало в двеналиатиперстную кишку, что обусловливало низкий уровень рН-волн: в проксимальном отделе 2,0 \pm 0,41, в дистальном - 2,9 \pm 0,23. Частота кислых рН-волн в проксимельном отделе была 1,3±0,13, в дистальном - 0,3±0,05 в I мин. Время закисления при рН < 2,5 составляло в проксимальном отделе 13±2,0 %, в дистальном - 1,7+0,34 %, а пои оН<5.0 в проксимальном отделе - 9+1,2 %, в дистальном - 2,6 + + 0.50 %. О недостаточности ощелачивания в двенадцатиперстной кишке свидетельствует также то, что кислые рН-волны были обнаружены у подавляющего числа (94 %) больных в проксимельном отделе кишки и у большинства (63 %) - в дистальном отделе.

Таким образом, у большинства больных язвенной болезнью, поступивших в санаторий, был выявлен ряд проявлений заболевания.

Клинической апробации КВЧ терапии предпествовали экспериментальные исследования на лабораторных животных, в процессе выполнения которых был установлен ряд оптимальных параметров КВЧ воздействия и зафиксировано улучшение процессов репарации при отсутствии побочного влияния.

Для карактеристики результатов санаторной терапии использованы следующие градации эффективности: положительные результаты (значительное улучшение), а также незначительное улучшение.

Прежде чем перейти к результатам комплексной санаторно-курортной терапии в целом, остановимся на влиянии различных ЛК на клинические проявления язвенной болезни и патологии со стороны других органов, функциональное состояние желудка и двенадратиперстной кишки, а также на процессы репарации в данных органах.

Таблица 1. Сравнительная частота исчезновения клинических проявлений язвенной болезни и патологии со стороны других органов после курса терации различными лечебными комплексами $(q \pm m_q)$

					-
Проявления	Частота исчезновения проявлений заболевания, %				
заболевания	JIK J& A	JK Na 2	лк и з	JK № 4	ЛK № 5
Боли. Симптом Менделя Болезненность в	81 ₊₄ ,8 88 1 3,9	95±2,4 100	99±1,2 100	90+3,6 89±3,7	95+2,9 95 <u>+</u> 2,9
точке Боаса Изжога Отрыжка Тошнота Рвота Понижение аппе-	96+2,4 8774,1 9373,1 9971,2	400 96+2,2 96 <u>+</u> 2,2 400 400	400 400 96±2,3 400 400	85+4,2 94+2,8 96+2,3 100 400	97+2,2 93+3,4 88+4,2 400 400
	100	100	∄00	100	00E
чени Нарушение стула	99+2,1 99 <u>+</u> 1,2 100	100 100 100	100 100 100	99 <u>+1.2</u> 97 <u>+</u> 2.0 100	95 <u>+</u> 2,9 100 100

Рассматриван результати таол. 1, можно отметить оолее вноскую эффективность ЛК # 2, 3 и 5, чем ЛК # 1, и ЛК # 3 по сравнению с ЛК # 4 относительно ликвидации основного проявления болевого синдрома — болей ($\rho < 0.05$). Изжога (достоверно $\rho < 0.05$) исчезала при применении ЛК # 3 чаще, чем при использовании ЛК # 4, 4, 5.

Влияние санаторно-курортного лечения с помощью различных ЛК на частоту улучшения показателей ощелачивания в проксимальном и дистальном отделах двенадиатиперстной кишки (путем усреднения данных четырех показателей, характеризующих ощелачивание) представлено в табл.2.

При анализе этих результатов выявлено, что ЛК № 2, 4, 5 (достоверно $\rho < 0.05$) в большей степени улучшают показатели ощелачивания в проксимальном отделе двенадратиперстной кишки, чем ЛК № 1. В то же время все использованные ЛК с близкой частотой улучшали показатели ощелачивания дистального отдела кишки.

Следует отметить что с применением ЛК № 1 и 3 происходило не-

Таблица 2. Вличние куроа терапии с использованием различних лечебных комплексов на частоту улучшения показателей оцелачивания в двенадцатиперстной кишке $(q\pm m_q)$

Отдел	Частота улучшения показателей ощелачивания, %				
01,400	JIK M I	лк ж 2	ЛК № 3	JK # 4	ЛК № 5
Проксимальный Дистальный	60±8,7 81±10,2	84 <u>+</u> 6,8 80 <u>+</u> 10,3	81 <u>+</u> 6,2 83 <u>+</u> 7,2	84 <u>+</u> 7,1 76 <u>+</u> 12,3	87±5,5 94±6,9

Таблица 3. Частота исчезновения проявлений язвенной болезни после курса терании с использованием различных лечебных комп-MERCOB (4 ± ma)

Проявления	Частота исч	езновения	проявлен	ий заболе:	вания,%
заболевания	JIK JA A	JK № 2	JIK № 3	JIK M 4	JK № 5
Язвенный дефект Эррозивно-воспали-	53 ±13 ,3	82 <u>+</u> 9,6	76 <u>+</u> 9,5	84 <u>+</u> 6,6	67 <u>+</u> 14,2
тельные изменения Дуоденогастральный	50±10,0	5012,1	48+11,2	67±8,7	42±9,5
рефлекс	80±20,0	0	50±50,0	56 <u>+</u> 16,7	50±18,9

большое, но достоверное улучшение одного из показателей кислотообразования в желупке.

При исследовании влияния санаторно-курортного лечения на ивигательную активность двенаднатиперстной кишки было выявлено, что ее нормализация или улучшение имели место у 55 % больных, продолжительность периода покоя нормализовалась или уменьшилась у 76 % обследованных (соответственно у этого же числа больных увеличилась продолжительность периода покоя), частота сокращений кишки стала реже у 72 % больных, а амплитуда сокращений - у 40 %.

Ив полученных по данным эндоскопии результатов (табл. 3) оледует, что ЛК № 4 (достоверно р < 0,05) в большей степени увеличивает частоту рубцевания гастродуоденальных язв, чем ЛК № 1.в остальных олучаях различия статистически несущественни.

С учетом совокупности пинамики клинических проявлений болезни, функционального состояния желудка и двенадцатиперстной кишки, процессов репарации в данных органах эффективность санаторно-курортной терапии может онть представлена следующим образом (табл.4).

В целом положительные результаты лечения отмечены у 88% больных. Из числа изученных ЛК наиболее эффективным оказался ЛК № 5, несколько ниже была эффективность ЛК № 4, 3 и 2.

Рассматривая полученные в работе результаты, отмечаем, что у больных язвенной болезнью, прибывших на лечение в стадиях ремиссии, нестойкой ремиссии и затихающего обострения, был выявлен целый ряд 102

проявлений язвенной болезни. Это потребовало проведения KOMIJERCHOTO CAHATODHO-KVDODTного лечения, которое оказалось эффективным при использовании всех ЛК у большинства (80 %) обольных

Клинико-лабораторный контроль состояния основных органов и систем организма больных не выявил побочного пействия примененных методов тера-TWW. YOUR FREE STREET STREET STREET

Таблица 4. Эффективность санаторно-курортной терапии язвенной болезни при использовании резличных лечебных комплексов (д ± m₂)

Лечебный	Частота лечебного эффекта, %			
Komilaeko	Положитель- ные резуль- таты	Незначи- тельное улучшение		
16 1 16 2 16 3 16 4 16 5	81+4,8 87,573,7 8873,7 9073,6 9273,5	19+4-8 12-573-7 11777-7 1073-6 843-5		

Выволы

- 4. Изученные методы аппаратной физиотерации и грязелечения сказались эффективными в комплексном курортном лечении больных язвенной болезнью, при одинаковой направленности действия внявлени особенности влияния примененных методов терапии в зависимости от клинических вариантов, характера их влияния на функциональное осстояние желупка и пвенациатиперстной кишки, процессы репарации.
- 2. При клинических наолюдениях внявлены эффективность КВЧ воздействия в комплексной терапии больных язвенной болезные и отсутствие побочных проявлений.
- 3. Наиболее эффективными в отношении болевого и писпепсического синдромов оказались сочетание грязелечения с электропунктурой. а также электропунктура.
- 4. Показатели кислотообразования в желупке несколько улучшаются при использовании пелоидотерании и ее сочетания с электропунктурой, в большей степени улучшаются показатели ощелачивания в двенадцатиперстной кишке при сочетании с грязелечением.
- 5. При вовлечении в патологический процесс печени и кишечника эффект терании у больных язвенной болезные был выше после применения электропунктурн и ее сочетания с грязелечением.
- 6. Процессы репарации более выражены при лечении с использованием КВЧ воздействия.
- 7. Низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ диапазона является эффективным методом лечения извенной болезни желуцка и пвенализтиперстной кишки в комплексном санаторно-курортном лечении.
- Василенко В.Х., Гребенев А.Л. Болезни желудка и 12-перстной ки-шки. М.: Медицина, 1981. 344 с.
 Радбиль О.С. Язвенная болезнь: Обзор. М.: Медицина, 1984. —
- 3. Iorant P., Kreimer E. Kpankheiten des Verdanungsustems in We-

in // Wien.-Med. - 1981. - 131, N 23/24, - P. 587-588.

4. Бурчинский Г.И. Язвенная болезнь желудка и 12-перстной кишки//

Практическая гастроэнтерология. - Киев. 1978. - С. 77-129.

5. Логинов А.С. Итоги развития клинической гастроэнтерологии за прошедшее пятилетие и ее перспективы // Терапевт. арх. - 1981. - 53. М 1. - С. 11-15.

6. Сереорина Л.А. Материалы к обоснованию лечебного применения

пелоидов при язвенной болезни: Пис. ... п-оа мел. наук. - М.

1.

1968. — 544 с. 7. Циммерман Я.С. Некоторне актуальные вопросы физиотерации и курорто— венной болезни // Актуальные вопросы физиотерации и курорто логии: Матер. обл. конф. физиотерапевтов, курортологов и врачей санаториев-профилакториев предприятий. - Пермь, 1974. -

8. Skapik M., Fixa B. Einflussader Kurbehandling anf die Immen-reaktivitat von Patienten mit Ulkuskrenkseit des Swolffingerdarms // Z.Physiother. - 1981. - 33, N 4. - P. 245-249.

9. Андреев Е.А. Белый М.У., Ситько С.П. Реакция организма человека на электромагнитное излучение миллиметрового диапазона// Вестн. АН СССР. - 1985. - № 1. - С. 24-32.

10. Применение волн миллиметрового пиапазона для лечения хроничеоких язв гастродуоденальной зоны / Л.З.Балакирева, М.Б.Го-лант, А.А.Головаток // Электрон. пром-сть. — 1985. — И 1. — С. 9-10. — 1985. — И 1. Применение электромагнитного КВЧ-излучения низкой интенсивно-

ти для лечения неосложненной гастродуоденальной язвы/П. Г. Гассанов, В. А. Зелинский, О. И. Писанко и др. // Там же. — 1987. — 1988.

13. Приборн для микроволновой диагностики в медико-биологических исследованиях и коррекции физиологических состояний организма при некоторых его патологиях / О.И.Писанко, Л.С. Назаренко, В.А. Добровинский и др. // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. — 1987. — Вып. 1. — С. 53—55.

14. Портнов Ф.Г. Электропунктурная рефлексотерация. — Рига: Зинат-

14. портнов w.т. олектропунктурная рефлексотерация. — гига. олектропунктурная рефлексотерация. — гига. олектропунктурная рефлексотерация. — гига. олектропунктурная рефлексотерация. — 191. А. Серебрина, м.а. Сивый // Открытия. Изобретения. — 1981. — № 9. — С. 23.

VIK 621.317+615.475

В.Д.Искин

NHCTPYMEHTAJISHSE METOJIS UCCJEJOBAHUR BUDJOJUYECKUX CUCTEM В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАЛИОВОЛН

Биологические эффекты (БЭФ) миллиметровых волн (ММВ) (КВЧ дианазонов: 37-78 TTu), впервые обнаруженные советскими исследователями более 20 лет назад и наблюдавшиеся в дальнейшем во многих научных лабораториях как в СССР, так и за рубежом, как известно, отличаются от биологического действия ионизирующей радиации и низкочастотных электромагнитных полей ряцом особенностей /1/: високан критичность к вариации частоти воздействующего излучения; очень низкий IO4 ABSTRUCTURE IN PROBLEMANT TRACTORS

энергетический порог проявления биологического действия; независимость от плотности потока мощности излучения в широком диапазоне ее изменения: отсутствие прямой пространственной корреляции между биологической зоной воздействия и зоной "отклика" на это воздействие в живом организме; совпадение биотропных параметров КВЧ излучения пля биологических систем различного уровня организации от микроорганизмов до человека.

Перечисленные выше и ряд других феноменологических аспектов проблемы /27 карактеризуют ее сложность и необходимость комплексного научного подхода, причем развернувшаяся в последнее время дискуссия вокруг некоторых важных вопросов, например, в связи с "резонансным" жарактером биологического действия микроволн, и наличие полярных точек зрения относительно каждого из них лишь усугубляют и без того сложную ситуацию при планировании и постановке конкретных экспериментов.

Следует отметить, что имеющиеся практические результати по прешносевной обработке зерна котя и отражают тенлениию тралиционного использования новых источников электромагнитной энергии в сельском козяйстве, но далеко не исчерпывают возможности КВЧ диапазона. Более того, по технико-экономическим соображениям /37 к наиболее вероятным перспективным областям применения КВЧ излучения в сельском хозяйстве в первую очередь, по-видимому, следует отнести селекцию, генную инженерию, иммуно-, крио- и радиозащиту геноносителей в растениеводстве, животноводстве, рибоводстве, экспериментальной ветеринарии, что, в свою очередь, определяет соответствующие объекты исследований: жидкие, гелеобразные и мелкодисперсные порошковые биологические материалы.

В этом плане упомянутие методологические трудности в проведении экспериментальных исследований вполне обобщаются двумя положениями /27.

1. До сих пор нет четких, определенных и всесторонне обоснованных критериев наличия БЭФ МиВ в том или другом конкретном эксперименте. Этот главный результат любых подобных исследований есть эффект или он отсутствует - всегда в значительной степени субъективен и зависит от интуиции и опита экспериментатора, корректности постановки опитов и многих других объективно неконтролируемых факторов.

Таким образом, назрела необходимость построения достаточно строгой и общей научной физико-математической аргументации постоверного обнаружения БЭФ ММВ с учетом как биологических (естественный разброс параметров контрольной среды, неконтролируемая возможная вариация внешних условий опыта и т.д.), так и радиофизических

(неравномерность СВЧ поля, нестабильность частоти, рассог псования в СВЧ тракте и т.д.) неопределенностей.

2. Отсутствует достаточно обоснованная и унифицированная тежническая элементная база проведения экспериментальных исследований, что, во-первых, создает значительные организационные трудности при проведении работ, во-вторых, исключает возможность перепроверки получаемых результатов в различных лабораториях, в-третьих, часто приводит к получению ложных БЭФ, мещает корректной постановке экспериментов и убедительной интерпретации полученных
результатов.

Причем можно с уверенностью утверждать, что благополучное разрешение второго комплекса вопросов — разработка, создание и широкое внедрение инструментальных методов и технических средств, специально предназначенных для исследования биологических систем в миллиметровом диапазоне радиоволи — не только актуально само по себе, но позволит также успешно справиться и с вопросами, упомянутыми в первом из указанных обобщений, взяв за основу, например, теорию обнаружения сигналов на фоне случайных помех: из дальнейшего будет понятна уместность этой теории применительно к данной проблеме.

Высказанные выше соображения определяют основные технические задачи на данном этапе: разработка методов исследования биологических систем с характерными размерами и 🛹 (культуры клеток.суспензии микроорганизмов, пыльца растений и т.п.), позволяющих ускорить и повысить достоверность индикации биологического действия КВЧ излучения; разработка устройств сопряжения элементов бази КВЧ диапазона с конкретными биологическими системами - устройств, удовлетворяющих как радиофизическим требованиям (низкий КСВН, равномерная структура ноля, отсутствие точки "перегрети и т.п.), так и биологическим (возможность стерилизации, простота реализации последующих биофизических методик анализа и т.п.); создание необходимой макетно-элементной базы, техническое и метрологическое обеспечение экспериментальной апробации разработанных методов и устройств в организациях медицинского, биологического и сельскохозяйственного профиля; технологическая и методическая подготовка серийного производства наиболее удачных технических решений для их широкого внедрения в сельскохозяйственную науку и производство, включая активные и пассивные КВЧ устройства.

В совокупности названные задачи характеризуют новое научное направление, кратко сформулированное в названии этой статьи, начало которому положено публикациями 4,5. Сюда вошли как теорети— 106

ческие радиофизические предложения автора, связанные с научной экспериментальной организацией исследований в частотном диапазоне 37-78 ITц, так и некоторые конструктивные разработки.

Поясним коротко сущность предлагаемого подхода, изложенного в $\mathcal{A}=67$.

Существующие методы поиска $\overline{5}\overline{2}\Phi$ микроволнового излучения заключаются в облучении одной или нескольких порций биологической среды КВЧ излучением на фиксированной частоте и последующем анализе свойств биологической среды по сравнению с контролем с целью установления корреляции между свойствами облученной среды и параметрами КВЧ излучения (мощностью, частотой).

Недостаток такого подхода — необходимость проведения цикла экспериментальных исследований на каждой фиксированной частоте (эта необходимость продиктована известной из множества публикаций ярко выраженной частотной зависимостью БЭФ ММВ, т.е. их узкополосностью). Следствием отмеченного недостатка являются чрезвычайная длительность, трудоемкость, рутинность поиска биологически активных радиочастот.

В отличие от изложенного традиционного подхода в основу предлагаемой методики исследований положено следующее техническое решение: биологическую среду облучают одновременно на нескольких частотах (или даже в полосе частот), а биологически активную частоту определяют по характеру пространственного (в системе координат, жестко связанной с исследуемой средой) распределения БЭФ в среде по априорно известному, заложенному при облучении алгоритму.

Сформулированний подход в случае его успешной реализации, несомненно, позволит существенно снизить временные затрати и трудоемкость экспериментального поиска биологически активных радиочастот, повысить достоверность получаемых результатов. Что же касается упомянутой практической реализации, то имеющиеся некоторые экспериментальные пробы дают основания для оптимизма.

Различные модификации этого метода и примеры его осуществления, учитывающие конкретные условия проведения экспериментов, свойства различных биологических систем и другие параметры, а также технические решения, расширяющие область применения предложенного метода, охвачены группой работ [4-19].

Необходимо подчеркнуть, что создание охарактеризованных выше методов и устройств с заданными параметрами требует исчернывающего знания диэлектрических свойств исследуемых биологических систем, что, в свою очередь, потребовало разработки соответствующих
измерительных средств. Здесь за методическую основу измерения ком107

at str

плексной диалектрической проницаемости биологических систем (а также небиологических имодельных жидких и порошковых веществ) была взята пиййеренциальная методика измерений, впервые предложенная В.А.Кашпуром и В.Я.Малеевым (1971 г.) и заключающаяся в просвечивании последовательно расположенных образцового и исследуемого объектов при вариации их геометрических размеров и постоянной суммарной толщине, т.е. при неизменном согласовании.

Этот ноиход был развит /20-23/ и практически реализован в группе публикаций, отраженных в резюмирующей работе /247. Сейчас осуществляются техническая проработка и экспериментальная апробация новых технических решений, изложенных в /25, 267.

В настоящее время на кафедре физики ХИМЭСХ имеются реализованные конструкторские разработки и аппаратурные стенды, направленные на решение ряда экспериментальных задач (рис. 1-4, см. вклейку).

Установка для измерения комплексной диэлектрической проницаемости разбавленных водных растворов (рис.1), внедренная в 1982г. во Все совзном научно-исследовательском институте животноводства Лесостепи и Полесья УССР для исследования свойств растворов куриного желтка /247, является прототипом создаваемых сейчас новых средств для дифференциальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости различных веществ и материалов.

На рис. 2 изображены киветы, конструкция и принцип работы которых нозволяет реализовать целый ряд предложенных новых технических решений как в области дизлектрических измерений /257, так и для исследований биологического действия КВЧ излучения на жидкие и порошкообразные системы /7, 11, 197. Простота и отработанная технологичность изготовления этих кювет, их многофункциональность и широкополосность позволяют уже сейчас ориентироваться на их широкое тиражирование и использование в практике биологических и сельскохозяйственных исследований.

Устройства, изображенные на рис. 3, как и предыдущие, представляются наиболее удачным решением задачи микроволновой обработки жидких биологических систем и монослоя культуры клеток. Несмотря на внешнюю простоту, эти устройства, реализующие ряд методических новинок [И. 25] и карактеризующие ся хорошими радиофизическими карактеристиками (КСВН 2) во всей частотной полосе КВЧ диапазона. содержат в себе несколько технических особенностей, обеспечивающих герметизацию биологической среды и волноводного тракта с возможностью стерилизации кивети нагреванием при температурах вплоть до 120-130 °C. Подобные устройства представляются первым щагом на пути повышения производительности микроволновой обработки биологи-**801**

ческой среди и доведения ее до технологически значимых в микробиологической промышленности объемов.

Установка, изображенная на рис. 4, предназначена для исследования воздействин КВЧ излучения на биологические липидные мембраны (БЛМ) и создана с помощью сотрудников Института проблем криобиологии и криомедицины АН УССР в плане технической реализации устройства /167.

Общая карактеристика полученных экспериментальных результатов в основном сводится к следующему: экспериментальная апробация разработанных средств измерения комплексной диэлектрической проницаемости влагонасыщенных систем подтверждает, что измерение действительной и мнимой частей комплексной дизлектрической проницаемости с точностью 0,3 % является вполне разрешимой задачей; экспериментальные результаты по воздействию КВЧ излучения на биологические системы в организациях биологического и сельскохозяйственного профиля в настоящее время могут быть сформулированы так: а) наличие вполне определенных БЭФ при воздействии СВЧ полн не вызывает сомнений у экспериментаторов; б) сущность зарегистрированных БЭФ позволяет уже сейчае ставить вопрос о широком внедрении разрабативаемых устройств в соответствующих отраслях.

Сказанное позволяет рассчитывать на то, что дальнейшие работы в названном научном направлении приведут к подтверждению некоторых известных и достоверному обнаружению новых БЭФ ММВ, а следовательно, к цели этих исследований: широкому внедрению в практику сельскохозяйственного производстава методов и устройств КВЧ диапазона, реализующих обнаруженные БЭФ на уровне новых высокоэффективных технологий.

Автор выражает признательность всем своим соавторам по докладу, сделанному на сессии Научного совета АН УССР по проблеме "Физика и техника миллиметрових и субмиллиметрових электромагнитных волн", материалы которого легли в основу этой статьи.

ных волн", материалы которого легли в основу этом статьи.

1. Зофекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на ойологические объекты /Под ред. Н.Д.Девяткова.—М., 1983.—220 с. Биологические эффекты миллиметровых волн: Обзор /В.Д.Искин, Ю.В. Завгородний, Н.М.Яценко и др. // Рук. деп. в ВИНИТИ.—
1987.— № 7591—В87.— С. 75.

3. Искин В.Д., Яценко Н.М. Биологические эффекты микроволнового излучения // Механиз. и электрифик. с.х. — 1987.— № 12.—С.39.

4. Искин В.Д. Радмофизические аспекты методологии поиска резонансных биологически активных частот в миллиметровом диапазоне радмоволи // Биофизические методы поиска биологических эффектов микроволнового излучения // Рук. деп. в ВИНИГИ.— 1987.—
18 7592—В87.— С. 49.

6. А.С. 1209239 СССР, МКИ А 61 № 5/02. Способ определения частот для воздействия на биологические ткани / В.Д.Искин, Л.П.Демина.

для воздействин на биологические ткани / В.Д. Искин, Л.П. Демина,

П.А.Клейман и до.//Открития.Изобретения.—1988.—№ 5.—С. 36.
7. А.с. 1234762 СССР, МКИ' G OI № 23/00. Способ определения биологически активных радиочастот / В.Д.Искин, М.Л.Тольдин,
Л.Ф.Кучин, А.В.Медведовский // Там же. — № 20. — С. 196.
8. А.с. 1325342 СССР, МКИ' G OI № 27/02. Способ контроля свойств
биологической средн / В.Д.Искин // Там же. — 1989. — № 27.

9. А.с. 1167483, МКИ GOIN 22/00. Устройство для поиска биоло-гически активных радиочастот / В.Д.Искин, Л.Г.Айзенберг, С.Д.Богаенко, Г.В.Арзамаснев // Там же. — 1985. — № 26.—С.172. 10. А.с. 1295906 СССР, МКИ GOIN 33/48. Способ поиска биологи— чески активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. — 1987. —

17. - С. 272.

11. А.с. 1170334 СССР, МКИ С ОІ № 22/00. Устройство для исследования микроорганизмов с использованием микроволн / В. Л. Искин, Г. В. Арзамасцев, Л.Ф. Кучин, В. А. Грабина // Там же. 4 1985. -

12. А.с. 13C)729 СССР, МКИЧ G OI N 22/00. Устройство для поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. —

1988. — № 11. — С. 285. 13. А.с. 1366925 СССР, МКИ GOIN 22/00. Способ поиска биологи— чески активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. — 1988. —

2. - С. 181. 14. А.с. 1357809 СССР, МКИ G 01 N 22/00. Устройство для поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин, А.Г.Лазаренко//

14. А.С. 1337000 СССР, МКИ G OI W 22/00. ЈСТРОИСТВО ДЛЯ ПОИСКА ОИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАДИОЧАСТОТ / В.Д.ИСКИН, А.Т.Лазаренко// Там же. — 1987. — № 45. — С. 162.

15. А.С. 1366926 СССР, МКИ G OI W 22/00. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОИСКА ОИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАДИОЧАСТОТ / В.Д.ИСКИН // Там же. — 1988. — № 2. — С. 182.

16. А.С. 1341559 СССР, МКИ G OI W 22/00. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОИОЛОГИЧЕСКИЙ СРЕДЫ / В.Д.ИСКИН, С.В.РУДЕНКО // Там же. — 1987. — № 36. — С.202.

17. ИСКИН В.Д. Метод ускоренного поиска частотно—зависилых биологических эффектов миллиметровых воли: Тез. докл. // УІ Всесоюз. семинар "Применение мм излучения низкой интенси тости в биологии и медицине". — Звенигород, 1986. — С. 98—99.

18. ИСКИН В.Д., Райс Б.Т., Медведовский А.В. Кюветы для микроволновой обработки биологических систем // Там же. — С. 100—101.

19. ИСКИН В.Д., Медведовский А.В. Разработка и экспериментальная апробация кювет для микроволновой обработки биологических систем // Рук. деп. в ВИНИТИ. — 1987. — № 2616—В87. — С. 19.

20. А.С. 853501 СССР, МКИ G ОІ W 22/00. Устройство для определения диэлектрической проницаемости растворов / В.Д.Искин, Л.Ф.Кучин, А.С.Черепнев // Открытия. Изобретения. — 1981. — № 29. — С. 210.

1. 2. Кучин, А.С. тереппев // Стирития. В 29. — С. 210.

21. А.с. 970199 СССР, МКИ СОТИВНЕНИЯ В 20. — В 40. — С. 175.

22. Искин В.Д., Кучин Л.Ф. Амплитудно-фазовый контроль жидкостей в миллиметровом диапазоне радиоволн // Приборы и системы управления. — 1983. — В 5. — С. 22-23.

23. Искин В.Д., Кучин Л.Ф. Радиоволновий контроль веществ методом дифференциальной модуляции зондирующего излучения // Электрон. обработка материалов. 1983. — 183. — С. 73—75.

24. Искин В.Д. Исследование свойств жидких растворов в миллиметро—

вом диапазоне радиоволн и разработка устройств контроля их малых изменений: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук. - Минск,

YIK 621.317+615.475

В. И. Искин. Г. Т. Буткус. А.В. Бутенко. А.В. Медвеловский ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ диздектрического стерын в воле

Введение. Одним из перспективных приложений техники миллиметровых воли (КВЧ диапазой: 37-78 ГТц) является использование излучения этого частотного диапазона в научных и практических задачах биологии, медицины и сельского хозяйства /1. 2/.

В настоящее время основные трудности в постановке корректных научных экспериментов, связанных с изучением биологического действия КВЧ излучения, сводятся к недостаточно звитой для указанных целей элементной базе КВЧ техники. Особые проблемы возникают при сопряжении конкретных биологических объектов. в том числе жидких биологических систем (БС). с источниками излучения: трудности согласования, устранение точек "перегрева", обеспечение изучения свойств биологической среды непосредственно в процессе микроволновой обработки и т.д., причем наиболее распространенный экспериментальный подход, заключающийся в использовании рупорных излучателей различных конструкций, расположенных над или под плоским слоем облучаемой ЕС, содержит весь набор упомянутых недостатков [3]. Это приводит к многочисленным артефактам и существенно усложняет интерпретацию получаемых результатов.

Настоящая статья посвящена экспериментальному изучению КВЧ излучателей, предложенных в ряде недавних публикаций /4-7/ и имеющих, по мнению авторов, значительные преимущества перед суще-CTBYIOUDINA.

1. Постановка и краткая характеристика запачи. В последнее время обозначился новый полкод к экспериментальному изучению биологического действия радиоволи КВЧ дианазона [4-9]. Этот подход заключается в установлении пространственной корреляции (в системе координат, жестко связанной с исследуемой БС) между амплитудой поля падающей на БС электромагнитной волны и свойствами биологической среды. Для практической реализации такого метода исследований в качестве одного из вариантов КВЧ излучателя предложен радиопрозрачный стержень, полностью погруженный в биологическую среду. а соотношение между диалектрической проницаемостью стержня \mathcal{E}_{er} и среди Ест онисывается неравенством Ест Сет [7]. Здесь необходимо подчеркнуть, что приведенное неравенство не только по определению нехарактерно для широко распространенных диалектрических волноводов, но и по существу содержит в себе мало изученный в

теоретической и прикладной электродинамике случай распространения электромагнитной волни в СВЧ тракте о граничными условиями, учитывающими комплексность диэлектрической проницаемости окружатывающими комплексность диэлектрической проницаемости окружатывающий среды.

В то же время именно прямоугольные диэлектрические стержни (ДС) представляют первоочередной практический интерес в конкретных задачах микроволновой радиобиологии в тех случаях, когда требуются плоскопараллельные и оптически прозрачные грани для микроскопических исследований БС, расположенных вблизи поверхностей стержня, непосредственно в процессе облучения. Например, в /5/ в такой системе предложено использовать режим стоячей волни для поиска участков БС, карактеризующихся экстремальными изменениями ее биофизических свойств, с целью последующего определения оптимальной биологически активной частоти КВЧ излучения; в /9/ описывается методика исследований БС, основанная на экспоненциальном затужании КВЧ поля вдоль оси стержня на его поверхности.

В связи с этим возникает ряд вопросов, касающихся возможности реализации с помощью описанного излучателя предложенных метощик исследований, а именно: каков характер затужания мощности КВЧ волны в биологической среде, расположенной на или волизи поверхности стержня вдоль его оси, и существуют ли пути варьирования этого затужания; возможно ли создание в БС периодической в пространстве и неизменной во времени амплитуды КВЧ поля с нулевыми значениями в узлах и равными расстояниями между ними (ведь глубина проникновения КВЧ поля в БС на порядок меньше его длины волны); какова модовая структура КВЧ поля в стержне; каким образом можно обеспечить энергетически равномерное облучение БС.

Далее при рассмотрении этих вопросов для определенности вместо реальной биологической среды (суспензии микроорганизмов, культурн клеток в физрастворе и т.п.) в качестве модельного объекта используется водопроводная вода, электрофизические свойства которой близки к свойствам названных БС.

2. Некоторые теоретические оценки. Строгое теоретическое рассмотрение особенностей распространения КВЧ волны в диэлектрическом стержне, окруженном водой (£ = 20+29,8 t на частоте 37,5 ГТц

ДОД) сопряжено со значительными трудностими. Более того, если
для аксиально-симметричных волноводных систем (стержень круглого
сечения) решение охарактеризованной задачи возможно котя би численными методами исходя из известного общего решения уравнений
максвелла в цилиндрических функциях ДОД, то для стержней прямоугольного сечения возникающие аналитические трудности связаны с невозможностью разделения переменных в получаемых дифференциальных

112

уравнениях и с некорректностью использования приближенных граничных условий Леонтовича — Шукина на границе диэлектрик — вода.

Тем не менее можно провести некоторые численные оценки для волны H_{10} , опирансь на ее представление в виде двух плоских волн, распространиющихся под углом друг к другу \$\ilde{L}_{12}\$.

Как известно [12], потери (погонное затухание & (мм⁻¹) вдоль оси волновода) в металлических стенках волновода могут быть рассчитаны из выражения

$$\mathcal{L}^{M} = \frac{1}{\tilde{\mathcal{E}}} \frac{A_{S} \oint H_{Sg}^{2} dt}{R_{C} \int \left[\tilde{\mathcal{E}} \times \tilde{H}^{*}\right] \tilde{t}_{Z}^{2} ds}, \tag{1}$$

где A_3 - активная составляющая поверхностного сопротивления на единицу длины проводника; A_2 - вектор, коллинеарный оси волновода; A_{tg} - тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля; A_1 и A_2 - параметр и площадь поперечного сечения волновода соответственно.

Из (1) следует, что в величину \ll дают вклад потери мощности в широких \ll и узких \ll стенках волновода: $\ll = \ll_f + \ll_g$. Для медных волноводов $\ll^{-1} = 10^{-5}$ мм $^{-1}$, причем раздельное интегрирование числителя (1) по \ll и по \ll позволяет рассчитать

$$\frac{df}{dg} > 1$$

Тогда для системи стержень — вода (С — В) согласно [4] \mathcal{L}_{f}^{f} может бить рассчитано классическими методами исходя из упоминутого разложения волни H_{TO} на плоские волни, а \mathcal{L}_{f}^{f} затем можно найти, используя значение $\mathcal{L}_{f}^{f} = 3$ для металлических волноводов, полученное из (1). Однако в этом случае \mathcal{L}_{f}^{f} оказывается значительно больше (~ 0.1 мм⁻¹), чем рассчитанное непосредственно по формуле (1) [4]. Это расхождение свидетельствует о существенном нарушении в случае С — В тех физических предположений и математических приближений, в рамках которых выведено внражение (1), что, в свою очередь вообще ставит под сомисные справедливость в данном случае неравенства (2). Описанные теоретические трудности, как следствие, содержат один из принципиальных вопросов, на которые может дать ответ только эксперимент: справедливо ли высказанное в [4] предположение о распространении в системе С — В волны, близкой по своей структуре к волне типа H_{TO} прямоугольного металлического волновода.

Далее, если проведенные в [4] оценки по порядку полученных величин олизки к истинным, то рассчитанное значение « приводит к цепочке неравенств

где $d_0^6 = 2,185$ мм $^{-1}$ [4] карактеризует погонное затукание в воде как таковой по закону

$$\rho' = \rho'_{g} e^{-2} \mathcal{L}_{0}^{f} \mathcal{X} \qquad (4)$$

Аналогичная зависимость имеет место и вдоль оси 2 стержня

$$P_{z} = P_{\theta z} \, e^{-2\mathbf{d}^{\delta} z} \,, \tag{5}$$

а потери мощности на единицу длини стержня или, что то же самое, плотность потока мощности до на облучаемой БС находятся из (5)

$$\rho = \frac{1}{L} \frac{\partial \rho_{\chi}}{\partial z} = \frac{2d^{\delta} \rho_{\sigma \chi}}{L} e^{-2d^{\delta} \chi}. \tag{6}$$

Из (6) следует, что для примерно равноэнергетического облучения ВС вдоль оси стержня в режиме бегущей волны (5) необходимо выполнение условия

При создании в стержне режима короткого замыкания путем, например, металлизации его торца для результирующей волны в стержне имеем

$$P_{z} = 2P_{oz} e^{-2a^{\delta}z} \sin kz \qquad (8)$$

и выполнение (7), как видно из (8), позволяет реализовать в стержне режим, близкий к режиму стоячей волни. В этом случае, как видно из сравнения (5) и (6), которые имеют одинаковую функциональ ную зависимость, в приповерхностных слоях стержня можно ожидать существования также периодической вдоль оси z структуры полн, повторяющей (с точностью до постоянного множителя) зависимость (8). Таким образом, выполнение (7) позволяет вплотную подойти к практическому осуществлению предложенных в [4-6, 8] методов исследования ВС.

Однако приведенные ранее численные оценки од даже при справедливости неравенств (3), которые, как уже говорилось, сами нуждаются в экспериментальном подтверждении, не дают оснований для выполнения (7) на величинах од достаточных для наблюдения нескольких (хотя бы двух) экстремумов стоячей волны с нулевыми значениями мощности в узлах.

Значительное уменьшение 🔏 с целью выполнения (7) на боль-II4 ших длинах стержня ж можно попробовать достигнуть покрытием поверхности стержня тонким слоем металла с соблюдением условия

$$d \ll d_0$$
, (9)

где « толщина слоя покрытия, в « величина скин-слоя (о 0,3 мкм) материала покрытия на используемых частотах. Если такой прием приведет к справедливости (7), то (8) преобразунется к виду

$$P(z) \simeq P_0 \sin kz$$
, (10)

и на поверхности стержня зависимость P(x) должна иметь аналогичный синусоидальный вид.

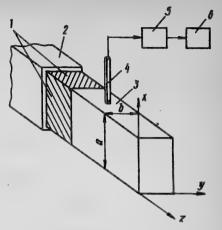


Рис. 1. Схема измерений: 5 — предусилитель с источником напряжения смещения; 6 — селек тивный нановольтметр

- <u>3. Описание экспериментальной установки и методики измерений.</u> Скема измерения структуры поля КВЧ излучения диэлектрических стерженй в воде показана на рис.1.

Исследуемые образци излучателей состояли из отрезков прямоу-гольных медных волноводов 2 стандартных сечений ($a \times b$), каждый из которых заканчивался отрезком диэлектрического стержня 3 — плавненого кварца марки КВ ($\mathcal{E}'=3,8$; $tg\mathcal{O}\simeq 10^{-4}$) с зеркально полированными поверхностями. Герметичность соединения волновода 2 со стержнем 3 обеспечивалась водостойким радиопроэрачным клеем K-400. Участки поверхностей стержня в месте соединения с волноводом предварительно металлизировались путем термического впекания азотно-кислого серебра 1 с толщиной покрытия не менее 5 мкм. Медные покрытия с толщиной слоя 50-200 Å, (т.е. меньше скин-слоя меди в используемом диапазоне частот; далее: СП — скин-покрытие) наносились путем вакуумного напыления.

Длина стержней выбиралась большей, чем рассчитанная из предположения $\mathcal{L}^6 \simeq 0.1$ мм⁻¹ (см. п.2) для затухания 60 дБ, и равнялась 60 мм. Ближний к генератору конец стержня для улучшения согласования имел форму пирамили висотой т5 мм. Каждый образец был снабжен емкостью, заполнение которой водой обеспечивало полное погружение ДС в воду. В описанных условиях коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) СВЧ тракта, измеренный с помощью панорамного измерителя КСВН и ослаблений Р2-65/68/69, с подключенным

ДС не превышал 1,7 (после заполнения емкости) в полосе частот 37-78 ITm.

Для измерения распределения полн применялся миниатюрный зонд 4, подробно описанный в /13/. Его основные жарактеристики, существенные для данного эксперимента, следующие: размеры - 0,3х0,8 х х 30 мм, пространственное разрешение - не хуже 0,3 мм, чувствительность в диапазоне 37-78 ГТц - не хуже 2 мВ/мВт см 2 в пересчете на плотность потока мощности плоской волны.

Выходной сигнал зонда Р пропорционален квадрату амплитуды электрического поля $1^{-\mathcal{E}^2}$). В эксперименте измерялись относительные величины, поэтому зонд не калибровался. Точность измерения составляла \pm 10 %.

Перемещение зонда в пространстве относительно стержня производилось с помощью треккоординатного механизма. В связи с конечными габаритами зонда, а также из-за трудностей визуальной юстировки исходное положение зонда устанавливалось с точностью 0,2мм. Погрешность относительных измерений и, у, и при перемещениях зонда не превышала 0,05 мм.

Во всех последующих экспериментах, где это особо не оговорено, чувствительный элемент зонда 4 (антенна с детектором — диодом Шоттки) находился на высоте не менее 0,3 мм над узкой стенкой отержня или на расстоянии не менее 0,5 мм от широкой его стенки, что связано с геометрией зонда.

4. Анализ результатов. На рис. 2, 3 показани зависимости $\rho(z)$, снятые вблизи широких и узких стенок стержней без покрытий (рис. 2) и с покрытиями (рис. 3). Штрихом изображени соответствующие зависимости от координаты z погонного затухания ω (для упрощения все обозначения ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_3 без утраты своего смысловото значения, которое следует из описания $\rho(z)$, заменены символом ω).

Из рис. 2 следует, что в пределах погрешностей измерений (~10 %) погонное затухание об вдоль узких стенок меньше затужания об вдоль широких стенок стержней. Значит, соотношение (2), полученное из (1) в предположении больших значений проводимости стенок волновода, справедливо и для рассматриваемого случая С — В.

Немонотонности в кривых на рис. 2, 3, особенно на начальных участках при небольших z, объясняются, по-видимому, наличием резкой границы металл — вода в материале стенок стержней и возбуждением на этой неоднородности вторичных волн. Эти волны, как видно из графиков, влияют на структуру пола не только волизи границы 116

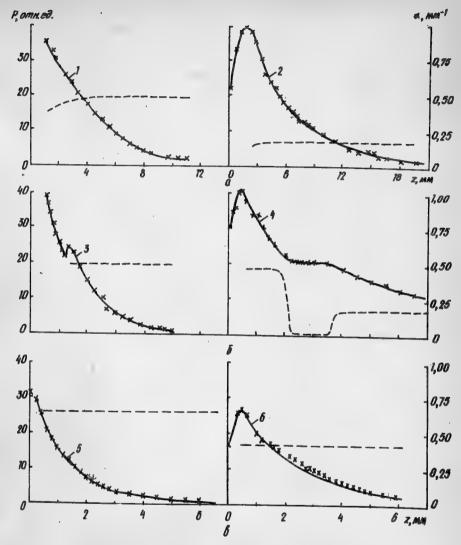


Рис. 2. Зависимости P(x) и d(x) (итриховые линии) волизи широких (кривые f, 3, 5) и узких (кривые 2, 4, 6) стенок стержней без проводних покрытий: $a - a \times b = 7.2 \times 3.4 \text{ мм}^2$, f = 38 ITu; $6 - a \times b = 5.2 \times 2.6 \text{ мм}^2$, f = 53.55 ITu; $B - a \times b = 3.6 \times 1.8 \text{ мм}^2$, f = 53.55 ITu

металл — вода, формируя характерный экстремум мощности, но, распространнясь вдоль оси г по радиопрозрачному стержню, фазируют ся с основной волной и тем самым нарушают экспоненциальный харак—

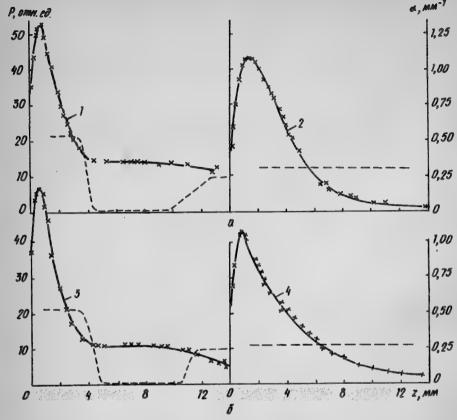


Рис. 3. Зависимости $\rho(x)$ и $\alpha(x)$ (штриковне линии) на частоте 53,55 ГГц волизи широких (кривне I, 3) и узких (кривне 2,4) стенок стержней сечением 5,2 к 2,6 мм² с проводщими СП: а — покрытие нанесено только на узкие стенки; б — покрытие нанесено на все четыре стенки стержня

тер продольного затухания на расстояниях, значительно превышающих глубину проникновения поля в воду.

Как следует из графиков, несмотря на отмеченные отклонения продольного затужания СВЧ поля от экспоненциального закона, коэффициенты затужания вблизи широкой стенки для стержней с СП меньше аналогичных коэффициентов для стержней без покрытий, а последние, в свою очередь, гораздо меньше упомянутого в п.2 погонного затужания \mathcal{L}_0^{σ} , жарактеризующего диссипативные свойства воды как таковой.

118

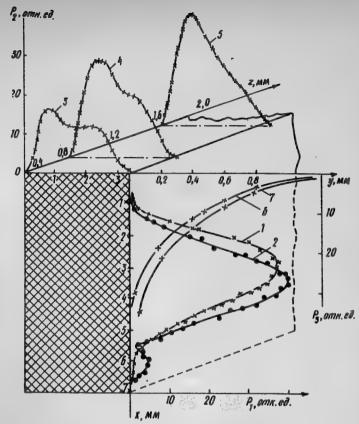


Рис. 4. Зависимости мощности от координат x, y, z при перемещении зонда поперек широкой стенки (кривне 1, 2 в координатах $P_7(x)$), поперек узкой стенки (кривне 3–5 в координатах $P_2(y,z)$) и при удалении зонда перпенцикулярно широкой стенке в направлении y (кривне 6, 7 в координатах $P_3(y)$)

Таким образом, описанные эксперименты подтверждают справедливость теоретических оценок (3).

На рис. 4 представлены зависимости P(x, y, z) в системах координат, связанных с ДС, причем заштрихованное поперечное сечение стержня расположено в плоскости xy.

Кривые 1, 2 отвечают на важный вопрос о модовой структуре поля в исследуемых системах. Вид этих зависимостей $P_{r}(X)$, снятых на частоте 53,55 ІТц поперек широкой стенки стержней различных сечений (кривая 1 для стержня 7,2 х 3,4 мм 2 , кривая 2 для стержня

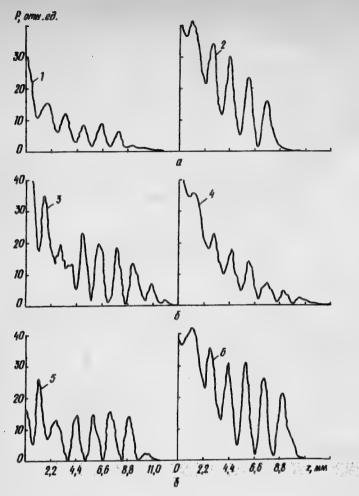


Рис. 5. Зависимости P(z) на частоте 53,55 ITц вблизи широкой (кривая 1, 2) и узкой (кривые 2,4) стенок стержней длиной l и сечением 5,2х2,6 м² с короткозамыкающим металлическим торцом: а -l=9 мм, без покрытия; 0-l=11,5 мм, СП на узких стенках; в -l=9 мм, СП на узких стенках

 $5.2 \times 2.6 \text{ мм}^2$), убедительно доказывает, что в обоих случаях в стерхнях распространяется волна, близкая по своей структуре к волне основной моды H_{70} металлического одномодового волновода.

Наличие поля $P_2(\Psi, X)$ волизи узкой стенки стержня (кривые 3-5 на рис.4 сняти на частоте 53,55 ГТц для стержня сечением 7,2х x 3,4 мм²) обусловлено отличной от нуля тангенциальной составляю—120

шей электрического поля на поверхности воды. При этом увеличение амплитуды поля в положительном направлении оси z коррелирует с карактером изменения f(z) (кривая z на рис. z, a).

Кривне 6,7 на рис.4, снятне путем удаления зонда в направлении, перпендикулярном широкой стенке стержня, карактеризуют зависимость P_3 (у) СВЧ мощности в воде и служат дополнительным подтверждением справедливости (3). Отсутствие в данном случае упомянутых ранее интерференционных эффектов обусловило строго экспоненциальный спад мощности. Эти эксперименти позволили рассчитать коэффициент $\mathcal{L}_0 = 2.7\pm0.05$ мм⁻¹ для воды на частоте 53.55 ГТц, который, как и следовало ожидать, не зависит от покрытия стержней (кривые 6, 7 сняты для СП и БП стержней сечением 5,2х2,6 мм² соответственно) и является функцией только частоты и электрофизических свойств воды.

Результаты описанных экспериментов были затем использованы для ответа на основной вопрос, связанный с возможностые создания на поверхности воды строго периодической структуры поля.

Для этого были использованы ранее исследованые стержни, зависимости P(x) для которых изображены на рис. 2,6 и 3,а. Стержни укорачивались до длины, позволнощей возбудить в ник отраженную от дальнего торца (закрытого металлической пластинкой) волну, близкую по амплитуде к падающей, й тем самым создать режим стоячей волны.

На первом этапе длини стержней выбирались такими, чтобы обеспечить равный КСВН, т.е. добиться примерно одинакового карактера увеличения размаха и уменьшения абсолютного значения амплитуды синусоидальной составляющей на фоне продольного затухания СВЧ поли в соответствии с (8). Соответствующие экспериментальные зависимости изображены на рис. 5,а и 5,6.

После повторного укорочения СП стержня до длини $\ell=9$ мм, которая, как следует из рис. 3,а (кривая 1), соответствует окончанию участка $\mathcal{A}(z)=0$, зависимость $\mathcal{P}(z)$ уже имеет ярко выраженную периодичность с несколькими близкими по величине экстремумами и, что особенно важно, нулевыми ординатами минимумов (рис. 5,в, кривая 5). Легко видеть, что этот график идентичен структуре поля стоячей волны (40) на длине стержня более 5 мм.

Сравнение рис. 5,а и 5,6, реализующих функциональную зависимость (8), и рис. 5,в. осщиллящим на котором вдоль широкой стенки близки к выражению (10), доказывает существенное влияние СП на продольный коэффициент затухания и возможность использования таких покрытий для формирования требуемой структуры поля на поверхности биологической среды.

Заключение. Экопериментальные результаты подтвердили высказанное в /4. 87 предположение о том, что КВЧ ноле в ЛС прямоугольного сечения, погруженном в воду, по своей структуре близко к полю волны Ндо в металлическом волноводе того же поперечного сечения и отличается от последнего лишь большими потерями в "стенках".

Результатом исследований явилось сопоставление коэффициентов затухания волизи широких 🔧 и узких 🕹 стенок ДС, а также отмеченное влияние на 🗸 и 💪 проводящего СП, толщина которого меньше толщини спин-слоя в материале покрытия в используемом частотном диапазоне. Отмечена возможность уменьшения поронного затухания & = 4, + 4, с помощью СП, что приводит и усилению неравенства « « и может быть использовано в устройствах [7] радиоволнового вноскочувствительного контроля состава и свойств веществ и материалов.

Обнаруженные нелинейности зависимости «(х) связаны, по-випимому, с возбужиением вторичных воли на границе металл - вода, причем можно сделать предварительный вывод о влиянии СП на величину и характер этой нелинейности, которую легко использовать для реализации равновнергетического (по плотности потока КВЧ мощности как функции от 🥒 🕽 облучения влагонасыщенных биологических систем с помощью предложенной антенны.

С помощью СП экспериментально получено на поверхности сильнопоглошающей модельной среды (воды) строго периодическое в пространстве и неизменное во времени распределение амплитуды КВЧ поля с нуловыми значениями в узлах и несколькими эквидистантно расположенными экстремальными значениями КВЧ поля, что указывает на возможность практической реализации новых методов [4-9] исследования биологических систем в КВЧ пиапазоне радиоволн.

Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. – 284 с.
 Биологические эффекты миллиметровых волн: Обзор / В.И.Искин, Ю.В.Завгородний, Н.М.Яценко и др. // Рук. деп. в ВИНИТИ. – 1987. – № 7591-887. – С. 75.
 Ряковская М.Л., Птемлер В.М. Поглощение энергии электромагнит— из волн. М.П. Птемлер В.М. Поглощение энергии электромагнит—

ных волн миллиметрового диапазона в биологических препаратах плоскослоевой структуры // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. — М., 1983. — С. 172-181.

4. Искин В.Д. Радиофизические аспекти поиска резонансных биологи-

чески активных частот в миллиметровом диапазоне радиоволн // Биобизика. — 1985. — 30, вып. 3. — С. 492. 5. А.с. 1170334 СССР, МКИ? G 01 N 22/00. Устройство для исследо вания микроорганизмов с использованием микроволи / В.Д. Искин, Г.В. Арзамасцев, Л.Ф. Кучин, В.А. Грабина // Открытин. Изобретения. — 1985. — № 28. — С. 165.
6. А.с. 1341559 СССР, МКИ С ОТ № 22/00. Устройство для исследова—

T22

ния свойств биологической среды / В.Д.Иокин. С.В.Руденко //

Там же. — 1987. — № 36, — С. 202. 7. А.с. 1305609 СССР, МКИ G OI R 27/26. Устройство для измерения параметров диалектриков В.Д. Искин // Там же. — № 15.—

С. 184. 8. А.с. 1209239 СССР, МКИ⁴ А 61 / 5/02. Способ определения час-

8. А.с. 1209239 СССР, МКИ А 61 И 5/02. Способ определения частот для воздействия на биологические ткани В.Д.Искин, Л.П. Демина, П.А. Клейман и др. // Там же. — 1986. — № 5. — С.36. 9. Искин В.Д., Медведовский А.В. Разработка и экспериментальная апробация кивет для микроволновой обработки биологических систем // Рук. деп. в ВИНИТИ. — 1987. — № 2616—В87. — С. 19. 10. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на свержвисоких частотах. — М.: Физматтиз, 1963. — 404 с. 11. Маркузе Д. Оптические волноводы. — М.: Мир, 1974. — 576 с. 12. 4альковский О.И. Техническая электродинамика. — М.: Связь, 1978. — 432 с.

1978. - 432 с.
13. Буткус Г.Т., Никалаускас К.К., Паума А.С. Измерение пространственного распределения электрического поля миллиметрового диапазона в биологических структурах // Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения / Под ред. Н.Д.Девяткова. М., 1987. — С. 230—234.

YIK 621.391

Г.А. Андреев. Т.А. Гладышев

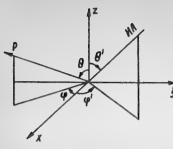
BJUNHHÆ HEPOBHOCTEN BEMHHX HOKPOBOB HA PACCERHUE И ИЗЛУЧЕНИЕ РАЛИОВОЛН

Методы дистанционного зондирования земных покровов в радиоводновом диапазоне получают в настоящее время все большее развитие применением аппаратуры, устанавливаемой как на наземных полвижных платформах, так и на летательных аппаратах /1-4/. При обработке и интерпретации получаемой с таких систем информации существенным оказывается влияние неровностей земных покровов на их тепловое излучение и рассеяние излучения толщи атмосферы. В настоящей работе на основе использования плоского альбедо и интегрального коэффициента рассеяния приведены количественные оценки влияния неровностей поверхности на излучение земного покрова и рассеяния ими излучения толщи атмосферы в активном и пассивном зондировании.

Геометрическая схема расположения приемопередающей аппаратуры приведена на рис. 1. Из обобщенной формулы Кирхгофа теплового излучения полубесконечной среди с гладкой границей раздела в приближении Рэлея - Яжинса для яркостной температуры получаем

$$\mathcal{T}_{\delta,2}(\theta) = \left(7 - |V(\theta)|_{\delta,2}^{2}\right) \mathcal{T} - x_{\delta,2}(\theta) \mathcal{T}, \tag{1}$$

 \mathcal{T} – температура среды; $\mathscr{L}_{6,2}(\theta) = 7 - |V(\theta)|_{6,2}^2$ – коэффициент излусреды; $\mathscr{L}_{6}(\theta) = \frac{\mathcal{E}'\cos\theta - \sqrt{\mathcal{E}' - \sin^2\theta}}{\mathcal{E}'\cos\theta + \sqrt{\mathcal{E}' - \sin^2\theta}};$ чения среды;



$$V_{\rho}(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon' - \sin \theta'}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon' \sin^2 \theta'}}$$

Френелевские коэффициенты отражения волны с вертикальной (в) и горизонтальной (г) поляризациями среды, с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) имеют вил

Рис. І. Геометрическая схема расположения системы пассив. Мы выбрали знак "плюс", как и у плоного дистанционного зондироской волны еску (гармонической по излучение атмосферы времени еску), распространяющей. ся в положительном направлении оси 2.

В диапазоне от миллиметровых

(мм) до дециметровых (дм) волн диэлектрическая проницаемость атмосферы \mathcal{E}_{σ}' (как смеси газов) описывается соотношениями, полученными из молекулярно-кинетических представлений /1, 3/. Взаимодействие молекул в дивлектрических проводящих жидких (морская вода), мятких (кожа, мишечные ткани биообъектов) средах, твердых (кварц, стекло), сыпучих (песок, грунт) материалах удовлетворительно описывается теорией релаксапионных процессов /5/.

Выражение пля КДП морской воды (или биоткани) по Дебаю [5] записывается в виде

$$\mathcal{E}(\omega) = \mathcal{E}_{\infty} + \frac{\mathcal{E}_{=} - \mathcal{E}_{\infty}}{1 + i\omega \tau} - \frac{G}{i\omega \mathcal{E}_{0}}$$
(3)

Из соотношения (3) получаются следующие выражения для действительной Е и мнимой Е" составляющих:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\infty} + \frac{\mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}}{1 + (\omega r)^{2}},$$

$$\mathcal{E}'' = \frac{\mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}}{1 + (\omega r)^{2}} + \frac{\mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}}{\omega \mathcal{E}_{0}},$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \frac{\mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}}{1 + (\omega r)^{2}} + \frac{\mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}}{\omega \mathcal{E}_{0}},$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} + \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} + \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} + \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} + \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}_{\infty}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \mathcal{E}_{\infty} - \mathcal{E}$$

ном (=) и гиперчастотном (оптическом) нолях; F - Время восетановления (релаксации) положения дипольных молекул после воздействия с частотой с электромагнитного поля; с - удельная прово-DUMOOTS.

В морской воде, почве в зависит от растворенных солей Д./. В отличие от токов проводимости первые члены в (3) карактеризуют тепловые потери из-за токов смещения зарядов, упруго связанных с положением равновесия 257. Для биотканей, влажных смесей почвогрунтов и других сред и материалов на мм волнах затруднительно выделить потери из-за токов смещения и токов проводимости, так как обычно экспериментально [6, 7] определяют действительную и мнимую состевляющие диалектрической проницаемости или эффективную удельную проводимость $G_{g,p} = \sigma$. В этом случае предпочитают пользоваться взаимозависимостью в виле

$$\mathcal{E}'' = \mathcal{E}_{sp}^{t} + \frac{G_{sp}}{\omega \mathcal{E}_{o}} = 60 \text{ AG} \tag{5}$$

Удобным является представление КДП через действительную составляющую и тангенс угла потерь соб:

$$e' = e(1 + itg\theta). \tag{6}$$

В этом случае комплексний показатель преломления среды записывается в виле

$$n' = \sqrt{\varepsilon'} = n + im,$$

где

Из записи составляющей плоской монохроматической волны в комплексном виде $E_{\gamma}=e^{ik\sqrt{E^{T}}}Z_{=}e^{ikmZ_{e}-kmZ}$ следует, что $n=\frac{C_{e}}{C}=\frac{\lambda_{e}}{\lambda_{e}}$ харак теризует показатель преломления, фазовую скорость и укорочение длины волны в среде по сравнению с вакуумом, а т - ослабление поля на длине волны 4/22. Погонный коэфициент ослабления интенсивности « = 2km. При нормальном падении проникновение поля в среду на глубину h_e с уменьшением в e=2.7 раз оценивается по соотношению

$$h_{\varepsilon} = \frac{\Lambda}{2\pi\sqrt{|\varepsilon'|} \sin \theta/2} \tag{8}$$

Из (8) видно, что для оценки глубини проникновения (излучения) поля необходимы данные о составляющих КЛП. Такие данные пля твердых материалов обично получают экспериментально, а для сыпучих сред из разных компонентов (смесей) - по математическим соотношениям, аппроисимирующим экспериментальные значения на основе регрессионного анализа /1/. Например, иля сухого песка выражение КЛП приобретает вид

$$\varepsilon' = \rho \varepsilon_a' + (1 - \rho) \varepsilon_b' , \qquad (9)$$

где $\rho = 1 - \frac{V_0}{V} = 1 - \frac{\bar{\rho}_0}{\rho_0}$ порозность; \bar{V} , $\bar{\rho}$ - объем, плотность песка и его основи (V_0 , ρ_0 , \mathcal{E}_0) (например, стекла или кварца). Измеренная КДП сухого песка на коротких мм волнах (частота около 140 ТТц) f_0^{ϵ} при плотности $\bar{\rho} = 1.4 \text{ г/см}^3$, оказалась $f_0^{\epsilon} = 3.8 + i 6.2 \cdot 10^{-2}$. Полагая, что основой является материал, аналогичный стеклу ($f_0^{\epsilon} = 3.8 + i f.9 \cdot 10^{-2}$, $f_0^{\epsilon} = 2.7 \text{ г/см}^3$), получаем $f_0^{\epsilon} = 1.4 \text{ г/см}^3$, из по соотношению (9) $f_0^{\epsilon} = 2.7 \text{ г/см}^3$, что по порядку величин удовлетворительно соответствует приведенным экспериментальным данным. В случае влажного песка и волны 8 · f_0^{ϵ} м из соотношения Улаби (f_0^{ϵ}) для составляющих КДП выводятся аппроксимационные зависимости от свободной объемной влажности f_0^{ϵ} в виде

$$\mathcal{E} = 42,3 \, \sigma_m \,, \quad \mathcal{E}'' = 39,7 \, \rho_m \, -2,22 \,$$
 (10)

Запишем зависимость между относительной весовой влажностью $q = \frac{m_W}{m_C} = \frac{m - m_C}{m_C}$ и объемной $\rho_m = \frac{V_m}{V_0}$:

$$P_m = q \frac{\rho_c}{(\rho_w + \rho_c q)} \tag{11}$$

В (40), (41) индексы w обозначают воду, c – сухой, а без индекса – влажный грунт.

Обычно $d_{q}q \ll 1$ и при $\rho_{W} = 1$ г/см 2 соотношение (П) представляется в виде $\rho_{W} \approx q \rho_{Q}$.

В ДЛ приведено более десяти аппроксимирующих выражений для КДП увлажненных почвогрунтов в диапазоне см и дм волн. В зависимости от цели применения соотношения в ДД, кроме свободной влажности, содержат: порозность, влажность, завядания, количество связанной влаги, предельную полевую влажность и т.д.

В [7] изложен метод определения КДП по модулю и аргументу коэффициента отражения (прохождения) материала (пахотного слоя) радиоволны с линейной частотной модуляцией.

В /8/ приведены модули, аргументы коэффициентов отражения и параметры КДП некоторых природных образований.

Как следует из изложенного, яркостная температура гладкого покрова зависит от КДП среды, его термодинамической температуры и угла наблюдения, что широко используется в системах дистанционного зондирования для определения влажности и температуры природных образований (1 - 47.

На практике, особенно в мм диапазоне, неровности большинства земных покровов сравнимы с длиной волны, поэтому для корректной интерпретации результатов измерений необходимо учесть их влияние I26

на формирование радиотеплового поля. При больших значениях параметра Рэлея [3] $P = 2kG_2\cos\theta\gg(k=2\pi/\lambda)$ — волновое число; G_3 — ореднеквадратическая висота неровностей поверхности) влияние неровностей учитывается в приближении метода касательной плоскости (МКП). Коэффициент излучения покрова $\pi_{\ell,2}$ при этом записывается [3, 97] в виде

где $a_{8,2}(\theta) = I - a_{8,r}(\theta)$, (42) где $a_{8,2}(\theta) = \frac{1}{4\pi\cos\theta} \int_{0}^{2\pi\pi/2} I^{8,2}(\theta, \theta', \theta') \sin\theta' d\theta' d\theta' - альбедо поверкности; <math>I(\theta, \theta', \theta')$ – индикатриса рассеяния повержности в приближении ММІ. Интегрирование в (42) ведется по углам, соответствующим верхней полусфере (см. рис.1). На рис.2 приведены рассчитанные по

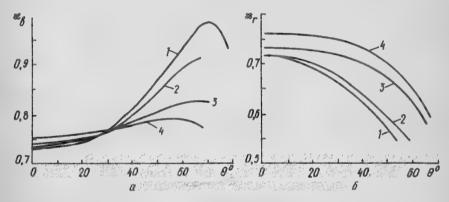


Рис.2. Угловая зависимость коэффициентов излучения песка: $4 \sim \sqrt{\langle r' \rangle} = 0$; 2 - 0,2; 3 - 0,4; 4 - 0,5; e' = 8,5 - i4,4

соотношению (2) коэффициенты излучения песка на вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризациях в зависимости от угла наблюдения при различных значениях среднеквадратического тангенса углов наклона неровностей $\sqrt{\epsilon'}$. Значение КДП онло рассчитано по эмпирическим соотношениям (40), полученным обобщением экспериментальных данных $\sqrt{47}$. При проведении расчетов КДП онла $\mathcal{E}=8,5+4.4$, что соответствует объемной влажности $\rho_m=0.4$.

Для сравнения на рис. 2 приведены коэффициенти излучения песка с гладкой границей раздела. Как видно из кода кривых, наличие неровностей приводит к сглаживанию угловой зависимости коэффициентов излучения покрова и уменьшению поляризационных свойств его радиотеплового излучения.

На практике при проведении измерений наряду с собственным ра-

диотепловым излучением нокрова на вход радиометра поступает рассеянное поверхностью тепловое излучение толим атмосферы.

Из соображений сохранения энергии при взаимодействии излучения с поглощающей (излучающей) средой (атмосфера, почва и т.д.) для спектральной яркости выводилось уравнение переноса излучения, решение которого в одномерном случае получается в интегральном виде /1, 3/.

В радмоволновом диапазоне (от дм до мм волн) тепловая энергия кт частиц среды больше энергия кванта бу. На этом основаны представления о тепловом электромагнитном поле как флуктуационном, возникающем из-за кастического, теплового движения заряженных частиц среды А. 37. При этом планковская спектральная яркость в первом приближении описывается законом Рэлея — Джинса.

В этом приближении выражение для яркостной температуры поглошающей, но нерассеивающей среды, например толщи атмосферы при наблюдении с Земли под углом θ от вертикали, записывается в виде

$$T_{R}(z_{0}) = \sec \theta \int_{0}^{z_{0}} d(z) I(z) \exp\left[-\sec \theta \int_{z}^{z_{0}} d(z) dz^{i}\right] dz \qquad (43)$$

Здесь $\mathcal{L}(z)$, $\mathcal{I}(z)$ — высотные профили погонного поглощения и температуры. Соотношение (I3) удобно представлять через интегральное поглощение в зените $\mathcal{L}_{Z} = \int_{-\infty}^{z_0} \mathcal{L}(z') dz'$ и интегральную (среднюю) температуру толщи средн

$$T = \frac{\int_{0}^{\infty} d(z)T(z) exp[-sec\theta \int_{0}^{\infty} d(z')dz']dz}{\int_{0}^{\infty} d(z)exp[-sec\theta \int_{0}^{\infty} d(z')dz']dz}$$
(14)

В виде $T_{\theta}(\theta) = \overline{f}(\theta)(1 - e^{-d\chi \sec \theta})$.

Для изотермической среды выражение (13) преобразуется в формулу

$$T(z) = T(z = 0) = T = \overline{T}$$
 (45)

$$T_{A} = T \left(1 - e^{-d_{X} 600 \theta} \right) = 2(\theta) T$$
, (16)

где $x(\theta) = (1-e^{-\lambda_z sec\theta})$ — коэффициент излучения слоя среды. В /1, 3/1 приведены яркостные температуры толщи атмосферы на частотах 1/1 300 ГГц в зависимости от влажности и зенитного угла. Из анализа этих зависимостей следует, что у безоблачной неоднородной атмосферы с приземной температурой 288 К и удельной влажностью $\rho=10$ г/м³, интегральным влагосодержанием $\ell=20$ кг/м² яркостная температу—128

ра на длинных мм волнах (37,5 ITц) составляет $I_0 = 25$ К, приземное погонное ослабление $I_0 = 0.12$ дБ/км, интегральное ослабление толщи $I_0 = 4.34$, $4_1 = 0.42$ дБ ($4_2 \sim 0.1$), на коротких мм волнах (140 ITц) соответственно $I_0 = 130$ К. $I_0 = 1.5$ дБ/км, $I_0 = 1.5$

$$T_{R}(\theta) = T_{Z} \frac{(1 - e^{-\lambda_{Z} \operatorname{see} \theta})}{1 - e^{-\lambda_{Z}}}.$$
(47)

В естественных условиях приема радиоизлучения толии атмосфери с увеличением зенитного угла на вход антенны радиометра поступает излучение окружающих местных предметов. Для измерения яркостной температуры толии атмосферы при больших зенитных углах (малых углах места) удобна методика приема сфокусированной антенной отраменного металлическим листом излучения атмосферы $\sqrt{10}$. Из данных $\sqrt{10}$ следует, что при зенитных углах $\theta \ge 87^{\circ}$ яркостные температуры толици атмосферы и покрова становятся одинаковыми. При гладкой границе раздела сред влияние атмосферы учитывается адцитивной добавкой в (1), Яркостная температура покрова в этом случае выражается в виде

$$T_{6,2} = x_{6,2}(\theta)T_n + |V_{6,2}(\theta)|^2 T_a(\theta) = x_{6,2}T_n = (1-x_{6,2})T_a(\theta). \tag{18}$$

Здесь $T_a(\theta)$ — угловая зависимость яркостной температуры неба. При ясном небе, когда величина интегрального ослабления мала, яркостная температура неба приближенно описывается законом секанса $[3]: I_a(\theta) \approx I_z$ 360 θ , где I_z — яркостная температура атмосферы при наблюдении в зенит. Как показывают выполненные расчеты для песка с объемной влажностью $P_m = 0.4$ и при $I_a = 30$ К, величина» добавки в (18), связанная с влиянием атмосферы, может доститать ~ 10 К.

При наличии неровностей поверхности необходимо учитывать рассеяние покровом издучения источника, непрерывно распределенного по небесной полусфере. Индикатриса рассеяния такого источника содержит тензорные компоненты, измененные АТ по сравнению с индикатрисой рассеяния падающей плоской электромагнитной волны 97. Яркостная температура поверхности с хаотическими неровностями при наличии издучения толщи атмосферы записывается в виде /3, 117

$$\widetilde{T}_{\delta,2}(\theta) = \widetilde{\mathcal{E}}_{\delta,2}(\theta)T_{\eta} + a_{\delta}^{\delta,2}(\theta)T_{\chi} , \qquad (49)$$

$$a_8^{8,2}(\theta) = \frac{1}{4\pi\cos\theta} \int_0^{\pi} d^{\theta'} \int_0^{\pi} T_3^{*}(\theta') \left[I_4(\theta',\theta',\theta) + I_2(\theta',\theta',\theta) \right] \sin\theta' d\theta' - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{1}{$$

интегральний коэффициент рассеяния теплового излучения толим атмосфери; I_{ℓ} , $(\theta, \theta', \mathcal{S})$ – индикатриса рассеяния излучения источника, непрерывно распределенного по небесной полусфере.

На рис. 3 приведены угловые зависимости интегрального коэффиимента рассеяния неска со среднеквадратическим тангенсом угла на-

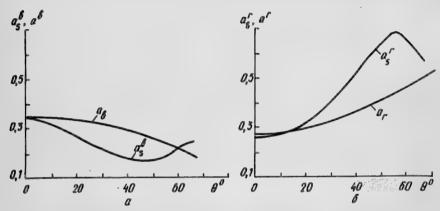


Рис. 3. Зависимость от угла падения интегрального коэффициента расоеяния и альбедо: а — вертикальная поляризация; б — горизонтальная поляризация; $\sqrt{\langle \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ }$ = 0,23; \mathcal{E}' = 8,5 + i 4,4

клона неровностей и для сопоставления - угловые зависимости альбело поверхности, Видно, что различия между альбедо и соответствующим интегральным коэффициентом рассения возрастают с увеличением угла наблюдения.

Описанный подход позволяет получить удобные соотношения, описывающие контрасти радиотеплового поли различных типов покровов (песок, суглинок и т.п.), что важно пля практического землепольвования, в частности для получения почвенных карт дистанционными рациометодами. Выражение для разности яркостных температур двух различних покровов с одинаковой термодинамической температурой имеют вид

$$\Delta T^{\mathcal{S},2}(\theta) = \mathcal{I}_{\alpha} \Delta^{\mathcal{S},2}(\theta) + \left(\Delta a_{\mathcal{S}_{1}}^{\mathcal{S},2}(\theta) - \Delta a_{\mathcal{S}_{2}}^{\mathcal{S},2}(\theta)\right) + \mathcal{I}_{\varphi} , \qquad (20)$$

где $T = I_0 - I_0$ - контрастообразующая температура; $a^{4,2}$ - разность между плоским альбедо и интегральным коэффициентом рассеяния по-130

√ – нескомпенсированная при измерениях разница боновых температур покровов /37

Полученные соотношения и количественные оценки позволяют проводить оперативную обработку и интерпретацию данных агромониторинга в системах автоматизированного управления сельскохозяйственными комплексами.

- I. Ulaby F. T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing: Active and Passive // Artech Hause (Washington). - 1986. -

- 2. Ту Всесоряная конференция по распространению радиоволи: Тез. покл. М.: Наука, 1987. 446 с.

 3. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых воли земними покровами / Зарубеж. радиоэлектрон. 1982. № 12. С.3—38.

 4. Андреев Г.А., Бородин Л.Ф., Рубцов С.Н. Радиояркостные контрастн земных покровов на миллиметровых и сантиметровых волнах / Изв. вузов. Радиофизика. 1980. 23, № 10. —
- С. 1266-1268. 5. Фрелих Г. Теория диэлектриков. М.: Изд-во иностр. лит.,

- 1960. 252 с.

 6. Исследования диэлектрических свойств земных покровов на миллиметовых волнах / Г.А.Андреев, В.В.Мариакри, Г.А.Гладышев и др. // Радиотекника. 1979. 34, № 5. С. 84—85.

 7. Измерение диэлектрических параметров почвы и других сред с применением ЛУД-сигнала / Г.А.Андреев, Г.А.Гладышев, С.А.Клыгин и др. // Д. Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. М.: Наука, 1987. С. 385.

 8. Миллиметровые волны и их применение // Зарубеж. радиоэлектрон. 1984. № 11. 252 с.

 9. Андреев Г.А., Куковкин А.Г., Черная Л.Ф. Альбедо и инцикатрисы рассеяния ММВ земными покровами с хаотическими не ровностями // Радиотекника и электрон. 1988. 33. № 7. С. 1352—1359.
- ровностями // Радиотехника и электрон. 1988. 33. м ?. С. 1352—1359.

 То. Андреев Г.А., Заенцев Л.В., Яковлев В.В. Дистанционный контроль интегрального ослабления миллиметровых волн в атмосфере с дождем по тепловому излучению // П Всесоюз. школасимпозиум по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере: Тез. докл. Фрунзе: ИЛИМ. 1986. С. 226—229.

 То. Андреев Г.А., Гладышев Г.А., Черная Л.Ф. Интегральный козфинимент расседния неровной поверхностью покроле телическое
- плент рассеяния неровной поверхностью покрова теплового излучения толщи атмосфери // XI Всесоюз. конф. по распространению радиоволи: Тез. докл. М.: Наука, 1987. С. 387.

УЛК 551.46.0:629.78

Г.А.Андреев, С.Г.Агратин, Г.А.Гладышев, О.К.Станкевич ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ ПО ЛИСТАНЦИОННЫМ ПОЛИРИЗАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ TELLIOBOTO PALINONSILY TEHNEL

В проблеме интенсиймкании и комплеконой автоматизации сельского козяйства важное значение приобретают методы дистанционного контроля температурного состояния почвы /1, 27. На основе теоретических оценок и экспериментальной проверки в данной работе обосновывается возможность применения дистанционных поляризационных измерений собственного теплового излучения пахотного слоя открытых почвогрунтов для оперативного контроля их термодинамической температуры.

Широкое применение получили методы определения температуры земных покровов T_{π} по измерениям с самолетов и с искусственных спутников Земли эффективной радиояркостной (далее яркостной) температуры теплового издучения в диапазоне от миллиметровых (мм) до дециметровых (дм) волн 🗗, 27. При этом обычно используется соотношение

$$T_{\delta,2}(\theta) = \mathbf{z}_{\delta,2}(\theta) T_{n} . \tag{1}$$

Snecь $\mathscr{X}(\theta)$ - коэффициент излучения, зависящий от дивлектрической проницаемости среды, неровностей границы раздела; 78.2 - яркостные температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях: θ — угол наблюдения, отсчитываемый от вертикали. Для среды с гладкой границей раздела коэффицменты излучения в (1) выражаются через френелевские коэффициенты отражения $V(\theta,\mathcal{E}')$ плоской волны ∕1. 27 в виде

$$\mathscr{Z}_{\delta,2}(\theta,\mathcal{E}') = 1 - |V(\theta,\mathcal{E}')|_{\delta,2}^{2} , \qquad (2)$$

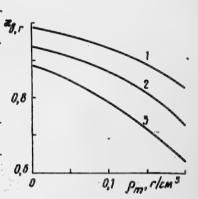
где & = £ + ¿Е" - комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) среды. По известной величине КДП и измеренной яркостной температуре покрова по соотношениям (1) и (2) оценивают его физическую температуру. Однако существующая в практике дистанционных измерений неопределенность КЛП приводит и значительным ошибкам в определении физической температуры по соотношениям (1), (2). Это обусловлено существенной зависимостью КДП покрова от его увлажненности. Известные полуэмпирические модели /27 КЛП почви наряду с влажностью содержат такие параметры, как порозность, точка завядания, связанная влага, предельная полевая влагоемкость и др. Множество 132

независимых параметров затрудняет практическое применение таких моделей. Иля непосредственного определения удобно пользоваться эмпирическими формулами, соцержащими объемную влажность почвогрунта и некоторые коэффициенты регрессии. Так, из анализа экспериментальных данных /2/ для песчаных поче на плинных мм волнах были подучены удобные соотношения, описывающие с точностью 5 % зависимость КШ от объемной влажности ρ_m при $\rho_m > 0.06$:

$$\mathcal{E} = 42.3 \, \rho_{m} \,, \quad \mathcal{E}'' = 34.7 \, \rho_{m} - 2.25 \,.$$
 (3)

Выражения (3) позволяют оценить погрешность вычисления термодинамической температури по соотношениям (1), (2) из-за неопрелеленности изменчивости влажности почвогрунтов. На рис. І привеленн теоретические зависимости коэффициен-

тов излучения песка с глалкой границей раздела от объемной влажности при наблюдении под углом 45° и в надир (кривая 3). Как следует из рис. 1. отсутствие точной априорной информации о влажности покрова может привести к большим (до 30 К) ошибкам при определении его термодинамической температуры по соотношениям (1). (2). Для исключения необходимости использования априорных данных о коэффициенте излучетия в (1) оказались целесообразными 21, 3, 47 по аналогии с поляризационными измере- Рис. Г. Зависимость от влажниями в оптике f5, f6 определение ния песка f6 гладкой границей при песка f7 гладкой границей нальных поляризациях под углом f7 поляризациях f8 гладкой границей поляризациях под углом f8 гладкой границей поляризациях под углом f8 гладкой границей поляризациях f9 гладкой границей поляризациях f8 гладкой границей f8 гладкой гран и оценка термодинамической темпера- $\theta = 45^{\circ}$; $3 - \theta = 0$ туры покрова по полиризационному соотношению для температур:



18,2 = \frac{7\frac{7}{2}}{2\frac{7}{2}}

Выражение (4) отличается от соответствующего соотношения в /5/.где использовалась взаимозависимость

$$|V|_2^2 = |V|_{\delta} \tag{5}$$

при угле 45⁰ для светящегося (нагретого) металла с гладкими границами раздела и выраженными поляризационными свойствами. Из (5) в

757 было получено выражение разност: температуры светящегося металиа и яркостной температури его полиризованного оптического излучения в приолижении закона излучения Вина. В радиодиапазоне в приближении Рэлея - Джинса спектральная яркость пропорциональна яркостной температуре, а не линейной экспоненциальной функции, соответствующей закону излучения Вина. Поэтому для коэффициентов излучения получается простое поляризационное соотношение 1, 2, 1, 3, 47

$$n_{x} = \frac{x_{f}^{2}}{2x_{f} + x_{f}}$$

которое при угле $\theta=45^{\rm O}$ является инвариантом $\eta_{_{\rm P}}=\eta_{_{\rm H}}=1$ для глалких покровов с ограниченной КЛП и обладающих полиризационными свойствами излучения (отражения). В условиях выполнения поляризационного инварианта ($n_{2} = 1$) и в отсутствие излучений окружающих предметов, толщи атмосферы, осадков поляризационное соотношение для яркостных температур (4), следующее из (6), совпадает со значениями термодинамической температури покрова:

$$I_{g,r} = I_u I_n = I_n \tag{7}$$

Соотношения (4), (7) позволяют оперативно оценивать физическую температуру покрова по измерениям его яркостной температуры на двух ортогональных поляризациях под углом 45°.

Реально при радиометрических наблюдениях на антенную систему наряду с радиотепловым излучением покрова поступает также переотраженное поверхностью излучение толщи атмосферы:

$$T_{\delta,r}(\theta) = \alpha_{\delta,r}(\theta)T_{\theta} + |V(\theta)|_{\delta,r}^{2} T_{\alpha}(\theta),$$
(8)

где 7 (в) - угловая зависимость яркостной температури неба. В этом случае термодинамическая температура покрова определяется по COOTHOUGHIND

$$I_{n} = \frac{(I_{n} - I_{a})^{2}}{2I_{n} - I_{g} - I_{a}} + I_{a}$$
 (9)

Здесь все яркостные температуры, как и прежде, берутся при угле 45°. Все величины, входящие в соотношение (9), измеряются, что дедает его удобным для практической оценки физической температуры покровов при наличии подсвечивающего излучения толщи атмосферы. Наличие неопределенности в значении величины 7 приводит к ошибкам в определении температури покрова. На рис. 2 представлена зависимость абсолютной ошибки ΔT_n в определении температуры покрова по соотношениям (4), (7) от величины яркостной температуры 134

неба. Как видно из хода кривнх, ΔT_{α} к большие значения влажности, увеличивая отражательную способность, приводят к росту погрешности измерений физической тем- 10 пературы.

Исходя из реально встречающихся значений влажности и яркостных температур атмосфери на длинных мм волнах /2, 37, максимальная абсолютная погрешность $AT_n = 3-12$ К, поэтому для повышения точности измерений температури целесообразно пользоваться соотношением (9).

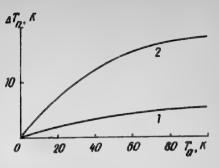


Рис. 2. Зависимость абсолютной ошибки A_B^{\dagger} от величини яркостной температуры неба при угле наблюдения $\theta = 45^{\circ}$: I песок, влажность $\rho = 0.1$ ($\varepsilon =$ =4,2+i1,2); 2-песок, влаж- $ность <math>\rho=0,2$ (6' = 8,5+i4,4)

Приведенные выражения точны лишь для гладких поверхностей раздела сред. На формирование радиотеплового излучения покрова, особенно в мм диапазоне, существенно влияют неровности граници раздела. Наличие неровностей приводит к сглаживанию угловой зависимости коэффициентов излучения $\widetilde{x}_{\ell,r}(\theta)$ [6, 7]. В этом случ , поляризационное соотношение (6) при $\theta = 45^{\circ}$ уже не обращается в инвариант, а выражается (4) в виде

$$\tilde{\Pi}(\Delta Z, Z) = \frac{\tilde{Z}_{r}^{2}}{2\tilde{Z}_{r} - \tilde{Z}_{g}} = \frac{\left(1 + \frac{\partial Z_{r}}{Z_{r}}\right)^{2}}{1 + \frac{\partial Z_{g}}{Z_{r}^{2}} + \frac{\partial Z_{g}}{Z_{g}^{2}}},$$
(10)

где $\tilde{Z}_{\ell} = Z_{\ell} - AZ_{\ell}$, $\tilde{Z}_{\ell} = Z_{\ell} + AZ_{\ell}$, $AZ_{\ell,\ell}$ — вариация коэффициента излучения из-за хаотических неровностей границы раздела сред. Неровности покрова со среднеквадратичными значениями висот несколько сантиметров в диапазоне ди воли учитываются на основе решения задачи рассеяния в приближении метода возмущений (МВ) [3]. В приближении МВ вклад рассеяния керовностями покрова в отраженное поле на десятки децибел меньше отражения когерентной составляющей, поэтому соответствующие поправки де, малы. В диапазоне мм волн кие неровности являются крупномасштабными по сравнению с длиной волны и их влияние оценивается в приближении метода касательной плоскости (МКП) [6, 7]. Коэффициент излучения в этом случае [3]

$$\widetilde{\mathcal{A}}_{\xi,r}(\theta) = 1 - a_{\xi,r}(\theta), \qquad (11)$$
 где $a_{\xi,r}(\theta) = \frac{1}{4\pi \cos \theta} \int_{0}^{2\pi} d^{\frac{\pi}{2}} \int_{0}^{2\pi} f(\theta,\theta',r') \sin \theta' d\theta$ — альбедо поверхности; $I'(\theta,\theta',r')$ — индикатриса рассеяния в приближении МКП [3]; $r=1$

азимутальный угол.

Относительная погрешность определения температуры покрова по

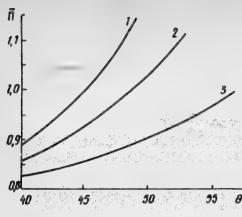


Рис. 3. Зависимость поляризационных со-шения влияния неровностей отношений (6) и (40) от угла наблюдения для различных неровностей: $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0$; $\frac{2}{2} = 0$, $\frac{2}{3} = 0$, $\frac{3}{3} = 0$

соотношению (6) при наличии неровностей записывает-

$$\frac{\Delta T_{R}}{T_{R}} = 7 - R(\Delta x, x) =$$

Из анализа кривых на рис. 3 с учетом (41) следует, что наличие неровностей приводит к значительным погрешностям: $\Delta II = 0.075$ при $\langle r^2 \rangle = 0.2 \text{ M} \quad A / = 0.15$ $\operatorname{IDM} \sqrt{\langle x^2 \rangle} = 0.3$. ILLH VMeHbпелеособразно использовать

более илинноволновые по сравнению с ними участки ралиолиапазона.

Учет теплового излучения толщи атмосферы, рассеянного неровностями покрова - 7 , удобно осуществлять по интегральному коэффициенту рассеяния $a_{x,y}^3$ [3, 7] и яркостной температурой неба в зените / с использованием соотношения

$$T_{\mathcal{S},r}(\theta) = a_{\mathcal{S},r}^{\mathcal{S}}(\theta) T_{\mathcal{I}}. \tag{43}$$

Из решения задачи рассеяния неровными границами земных покровов излучения источника, непрерывно распределенного по небесной полусфере, для коэффициента рассеяния получаем

$$\alpha_{\delta,r}^{S}(\theta) = \frac{1}{4\pi\cos\theta} \int_{0}^{2\pi} d\theta \int_{0}^{\pi} I_{\delta,r}^{*}(\theta') I_{\delta,r}^{*}(\theta',\theta,\theta') d\theta \qquad (14)$$

где $I_{\alpha}^{f}(\theta) = I_{\alpha}(\theta)/I_{\alpha}$; $I_{\alpha,r}^{f}$ - индикатриса рассеяния непрерывно распределенного по небесной полуофере источника излучения. С учетом (11). (13 и (14) выражение для эффективной яркостной температуры неровного покрова с учетом подсвечивающего излучения атмооберн записывается в виде

$$\tilde{I}_{6,r}(\theta) = \tilde{e}_{6,r}(\theta) I_n + a_{6,r}^{S}(\theta) I_Z$$
 (15)

Относительная погрешность определения температуры покрова в этом случае оценивается по соотношению 136

$$\frac{\Delta T_{R}}{T_{R}} = 1 - \frac{\left(z_{r}T_{z} + \Delta z_{r}T_{R} + T_{z}\left(1 + \Delta a_{r}\right)\right)^{2}}{\left(Z\left(2z_{r} - z_{g}\right) + T_{R}\left(2\Delta z_{r} - \Delta z_{g}\right) + T_{z}\left(2\Delta a_{r} - a_{g}\right) + T_{z}\right)T_{R}},$$
(16)

где $I = I_0 = I_2 = 1$ - контрастообразующая температура (3, 8).

Анализ соотношения (16) показывает, что совместное влияние издучения тодии атмосферы и неровностей поверхности может приводить к их взаимокомпенсации. Например, для сухого песка (🐔 😑 = 2,5 + 10,06) со среднеквадратичными тангенсами углов наклона неровностей $\sqrt{\langle r^2 \rangle} = 0.4$ и термолинамической температурой $I_a = 290$ К в отсутствие подсвечивающего излучения атмосферы погрешность в опрелении температури составляет АЛ, ~1 К. При наличии излучения атмосферы о $I_z = 30$ К эта ошибка уменьшается до $J_z \sim 0.04$ К, что приемлемо для практических измерений.

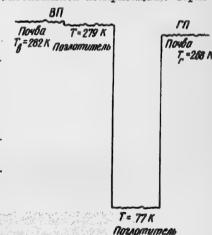
Экспериментальная проверка метода была осуществлена по определению температуры песчаного покрова с $\sqrt{\langle r^2 \rangle} = 0.1$. Измерения проводились в натурных условиях при ясном небе. Внеота расположения радиометрической аппаратуры составляла 1,5 м, угол наблюдения $\theta = 45^{\circ}$, диаметр антенного пятна $I \approx 0.3$ м. Калибровка произвопилась по абсолютно черному телу при температуре окружающей среды и охлажценному жилким азотом (T = 279 K и T = 77 K).

На рис. 4 приведены фрагменты записи радиояркостной температуры покрова на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Термо-

" динамическая температура покрова, измеренная термометром, заглубленным на 2 см. составила $T_a =$ = 279 К. Вычисленные для этих исходных данных по соотношению (46) погрешности в определении температуры покрова составляют 47, = = 2.5 К. в то время как в эксперименте (см. рис.4) получена разность между температурой, рассчитанной из поляризационных измерений и измеренной термометром:

11, = 4 K.

Таким образом, наблюдается удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных оценок погрешностей. Это указыва- Рис. 4. Фрагменти записи радиоет на возможность эффективного использования поляризационных ра- поляризации



яркостных температур: ВП и ПП вертикальная и горизонтальная

пиометрических измерений для пистанционного определения термодинамической температури земных покровов без растительности при достаточной точности установки угла наблюдения. В случае больших неровностей поверхности (вспаханное поле и т.п.) для уменьшения возникающих погрешностей в определении температури целесообразно использовать более длинноволновые (дм волны) участки радиодиапазона.

 Богородский В.В., Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 221 с.
 Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing. Active and passive // Artech House (Washington). — 1986. — 2.— P. 1098-1103.

Р. 1098-1103.

3. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волы земными покровами // Зарубеж. радиоэлектрон. — 1982. — № 12. — С. 3-39.

4. О дистанционном определении температуры земных покровов по полиризационному инварианту СВЧ-радиотеплового излучения /Т.А.Андреев, Л.Ф.Бородин, Л.В. Зайцев и др. // Исследования Земли из
космоса. — 1984. — № 4. — С. 120-123.

5. Tingwaldt C., Schley U. Eine optische Metode zur directen Ermitlung der wahren Temperatur glühender Metalle // Z. Instr.1961. — 69, № 7. — S. 205-207.

6. Андреев Г.А., Черная Л.Ф. Рассеяние излучения миллиметровых
воли природными объектами // Радиотехника. — 1988. — 42, № 3.—
С. 62-68.

C. 62–68.

7. Андреев Г.А., Гладышев Г.А., Черная Л.Ф. Интегральный коэффице-ент рассеяния неровной поверхностью покрова теплового излуче-ния толим атмосфери / М Всесоюз. конф. по распространению ра-пиоволн: Тез. докл. — М.: Наука, 1987. — С. 387. 8. Андреев Г.А., Боровин Л.Ф., Рубцов С.Н. Радионркостные контра-

стн земных покровов на миллиметровых и сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. — 1980. — 23, № 10. — С. 1266-1268.

YIK 551.596.08

В.В. Зверев, Г.П. Ермак, В.В. Россихин, С.Д. Алексеевский

БИОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА RIMHAITANI N

В настоящее время достижения медицинской техники позволяют применять в практике сложные физиологические методы исследования.

В данной работе описана конструкции приборов биокомплекса, составленная из прибора для определения объемной скорости потока биологических жидкостей и прибора для определения давления в полых органах. соепиненных с единым регистрирующим устройством.

Учитывая, что биокомплексы отечественной промышленностью не выпускаются, настоящая работа может быть полезной для специалистов. работающих над созданием медтехники, н биологов, изучающих вопроси дистальной уродинамики.

Предлагаемый нами прибор (рис. 1) состоит из приемного блока, патчика, преобразователя импульсов и регистрирующего блока. **I38**

Приемный блок включает в себя воронку Т. рассекатель 2, который имеет форму усеченного конуса с канавками по краям, и формирователь потока 3, укрепленный на нижнем конпе воронки.

Патчик состоит из пластивесового корпуса ? и заключенной в нем семилопастной крыльчатки 6 с расположенными на ее оси пвумя магнитами 5. Лопасти крильчатки особой формы, благодаря чему обеспечивается постаточная чувствительность прибора.

Рис. 1. Прибор для определения объем-На опной из стенок ной скорости потока корпуса датчика расположен геркон 4. соединенный с

преобразователем импульсов и регистрирующим устройством.

Принцип работи данного прибора заключается в том, что жилкость, поступая в воронку, равномерно распределяется по ее стенкам с номощью рассекателя, наличие которого исключает турбулентность движения потока, а формирователь потока обеспечивает равномерность подачи ее на лопасти крильчатки.

Пол воздействием струи жилкости крыльчатка вращается. На олной оси с ней расположены два магнита. Создаваемое ими магнитное поле с частотой, в два раза большей частоти вращения крыльчатки. включает геркон. Он замыкает цепь: "+" источника питания - геркон - резистор РТ - "-" источника питания (рис. 2).

На резисторе видим положительные импульсы с частотой слепования, равной частоте включения геркона. Длительность этих импульсов зависит от скорости вращения крильчатки. Через дифференцируемую ценочку, собранную на СЛ, В2, и ограничивающий резистор РЗ импульсн поступают на базу транзистора УТІ. На транзисторе УТІ, а также на УТ2, УТЗ собран формирователь импульсов. Он позволяет получить импульен постоянной длительности. Дифференцирующая пепочка, включенная на входе, формирует короткие запускающие импульсы.

В исходном состоянии на выходе формирователя устанавливается

I39

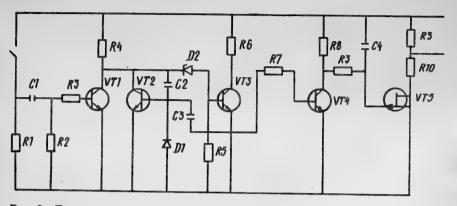


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя импульсов

низкий потенциал. Транзистор VT3 открыт током, текущим по цепи "+" источника питания — P4—VT2 — база VT3, транзисторы VT1, VT2 закрыты. С приходом положительного импульса транзистор VT1 открывается, а VT3 закрывается. Конденсатор С2 через открытый транзистор VT1 соединен с землей и разряжается. После окончания запускающего импульса транзистор VT1 закрывается, конденсатор С2 начинает заряжаться по цепи "+" источника питания — P4 — C2 — база транзистора VT2. Этот каскад представляет собой интегратор, поэтому конденсатор заряжается по линейному закону.

По окончании заряда конденсатора транзистор VT2 закрывается, а VT3 открывается.

К выходу формирователя импульсов подключен электронный ключ, собранный на транзисторе УТ4. Через открытый ключ заряжается конденсатор С4 по цепи "+" источника питания — С4 — К9 — УТ4. Сигнал с конденсатора поступает на вход истокового повторителя, собранного на транзисторе УТ5. С делителя напряжения ВІО, ВІТ сигнал поступает на вход регистрирующего прибора.

Предлагаемий прибор позволяет определять объемную окорость тока жидкостей в пределах 0,0001–0,004 $\rm m^3/c$ (1–40 мл/с) при погрешности измерений \pm 7 %, кроме того, производится графическая регистрация объемной скорости потока.

Калибронка прибора осуществляется достаточно простой и бистрой методикой. Источник води — обичний лабораторный кран. Истинную скорость определяют путем измерения объема воды в градуированном пилиндре за данный период времени (1-30 с). Время регистрируется лабораторным секундомером.

Исследования повторяют до получения двух идентичных результа-

тов. Струю води направляют в коллекторную воронку прибора и регистрируют скорость ее течения. Постоянство скорости течения проверяют с помощью измерительного пилиндра и секундомера. Общее расхождение составляло 1,6 %.

Второй составной частью биокомплекса является прибор для определения давления. Основная
часть этого прибора —
электроманометр. Предлагаемий нами электроманометр позволяет регистрировать колебания давления
внутри полых органов практически без искажений
за счет уменьшения рабочего объема мембранного
датчика и использования
жесткой мембрани.

Основным узлом предлагаемого электроманометра является датчик давления с пределами измерений 0 - 20 Па при погрешности измерений ± 10 %.

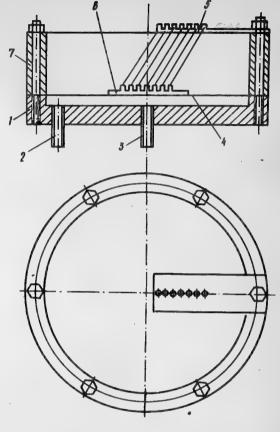


Рис.3. Прибор для измерения давления

Датчик давления (рис.3) представляет собой металлический корпус 1 с внутренним объемом 0,9 мл. Имеет два штуцера:3 — для присоединения к катетеру и 2 — для удаления пузирьков воздуха из полости.

Рабочим органом датчика служит мембрана 4 из бериллиевой бронзи толщиной 0,1 мм, на которую с внешней сторони нанесен фольговий тензодатчик 6 типа ФКМВ-20-100. Выводи тензодатчика соединени с клеммами 5. Достаточная жесткость мембрани и подобранный рабочий объем датчика позволяют использовать для передачи давления от полого органа к датчику укороченные катетери диаметром 2-4 мм, длиной 300-350 мм, что не вносит динамических искажений при записи изменений давления. Электрическая блок-схема включения датчика

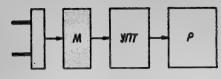


Рис. 4. Блок-схема тенводатчика

представлена на рис. 4. Тензодатчик включен в два плеча уравновешенного моста (М), к виходу которого подключается усилитель постоянного тока (УПТ), обеспечивающий надежную регистрацию сигналов разбаланса моста самопишущим регистратором (Р).

Электроманометр работает следующим образом: перед началом измерений датчик с помощью штатива устанавливают на уровне дна исследуемого органа по принципу сообщающихся сосудов. Пропуская жидкость через штущер 3 (рис. 3), витесняют весь воздух из внутренней полости 7, после чего штущер 2 перекрывают.

В процессе наполнения любого полого органа давление жидкости в нем передается его мембране. В результате она изгибается, что приводит к изменению сопротивления тензодатчика и разбалансу моста, в плечо которого он включен. Сигнал, получаемый с диагонали моста, усиливается и передается на измерительное устройство с самопишущим регистратором. Калибровка датчика производится с помощью водного манометра.

СОПЕРЖАНИЕ

Малеев В.Я., Кашпур В.А. О молекулярных механизмах взаимодей- ствия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с белками и ДНК. Теория и эксперимент	,
Глибицкий Г.М., Каштур В.А. Метод измерения диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне растворов биоматериалов в зависимости от температурн	
Банников В.С., Веденский О.Ю., Ермак Г.П., Абраменко И.С., Колесник О.Л., Скрынник Б.К., Шестопалов В.П. Новый высоко— эффективный метод контроля функционального состояния биообъ— ектов	
Пияновский С.В. Спиновый механизм влияния миллиметрового из- лучения на биологические процессы	
Шестопалова Н.Г., Головина Л.Н., Петрушин А.А., Корнеенков В.К. Реакция клеток растений на действие радиоволн миллиметрового диапазона)
Малая Л.Т., Щеголева Т.Ю., Бахова Л.К. Применение миллимет- ровой дизлектрометрии в биологии и медицине	,
Сериков А.А., Христофоров Л.Н. Об эффектах воздействия микро- волнового электромагнитного излучения на биомолекулярные си- стемы	
Ворсуль К.В., Смирнова Т.А., Черпак Н.Т. ЭПР — спектрометр диапазона длин волн 4—1,5 мм	
Бобрышев В.Д., Снурников А.С., Швед В.Б. Диэлектрический ра- зогрев крисконсервированных клеточных суспензий в сантимет- ровом и миллиметровом диапазонах	3
Тайдидей Ю.Б. О взаимодействии вибронно возбужденных биопо- лимеров с внешними электрометнитными полями	}
Чалый А.В. Влияние внешнего электромагнитного поля на процесси упорядочения в средах с биохимическими реакциями 66	
Швед В.Б., Боорышев В.Д. Контрастирование зон холодовой не- кротизации в сочетании с микроволновым воздействием 74	t
Радченко Д.Г., Слабкая И.А. Возможний механизм работы синац- са как неравновесной системы, восприимчивой к влиянию внеш- них физических полей	,
Ордынец А.Т. Абсорбционный метод исследования спектральных неоднородностей в биологических средах	,
Соломонов В.И., Писанко О.И., Мосежный А.Е., Кириченко Г.И., Туранский В.П. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапазона на оптические свойства кожных покро-	
BOB	

Соломонов В.И., Писанко О.И., Мосежный А.Е., Кириченко Т.И., Туранский В.П. Влиние низкоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапавона на теплопродукцию эпигастральной области	96
Зелинский В.А., Писанко О.И. Низкоинтенсивное электромат- нитное излучение КВЧ диапазона в комплексном курортном ле- чении язвенной болезни	97
Искин В.Д. Инструментальные методы исследования биологичес-ких систем в миллиметровом диапазоне радиоволн	104
Искин В.Д., Буткус Г.Т., Бутенко А.В., Медведовский А.В. Исследование структурн поли излучения диалектрического стержня в воде	111
Андреев Г.А., Гладышев Г.А. Влияние неровностей земных по-	123
Андреев Г.А., Агратин С.Г., Гладышев Г.А., Станкевич О.К. Определение температуры почв по дистанционным поляризацион- ным измерениям теплового радионзлучения	132
Зверев В.В., Ермак Г.П., Россихин В.В., Алексеевский С.Д. Биобизический комплекс для определения объемной скорости потока и давления	138

Рефераты

УДК 621.3.029.65:577.3.2

О молекулярных механизмах взаимодействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с белками и ДНК. Теория и эксперимент / Малеев В.Я., Кашпур В.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч.тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 3—10.

Обсуждени литературные и оригинальные данные, относящиеся к теоретическому и экспериментальному изучению колесательных состояний белков и ДНК в интервале частот, включающем сантиметровые, миллиметровые волны. Анализ этих данных показал, что хотя теория предсказывает существование различного рода колесаний в этих биополимерах, частоты которых попадают в указанные диалазоны электромагнитных волы, экспериментально такие колесания, как правило, не обнаруживаются. По мнению авторов, для существования острых резонансов в этих биополимерах вообще нет достаточно разумных физических оснований. Что же касается "нормальных" резонансных эффектов (с добротностями порядка 10-100), то такая оитуация в принципе возможна, но для надежного обнаружения таких колебаний требуются дальнейшая разработка чувствительных экспериментальных методов, способных выделить искомые эффекты на фоне преобладающего поглощения водой, и развитие теоретических моделей, максимально учитывающих реальные экспериментальные условия. Библиогр.: 30 назв.

УДК 621.3.029.65:577

Метод измерения диэлектрической проницаемости в миллиметровом дианазоне растворов биоматериалов в зависимости от температуры / Глибицкий Г.М., Кашпур В.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового дианазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 10-14.

Разработан диэлектрометр миллиметрового диапазона, предназначенний для изучения биоматериалов в температурном интервале 5—90 °C. Измерения комплексной диэлектрической проницаемости производятся волноводным мостовым методом при использовании киветы переменной толщины. Непосредственно определяемыми величинами явля—

отся поглошения и фазовая постоянная. Точность измерений составляет 2-3 %. С помощью данного диэлектрометра исследованы диэлектрические свойства воды и водных растворов некоторых биологических веществ в диапазоне длин волн 6-8 мм и температурном интервале 20-80 С. Ил.1. Табл.4. Биолиогр.: 7 назв.

УЛК 577.35:537

Новый высокоэффективный метод контроля функционального состояния биообъектов / Банников В.С., Веденский О.Ю., Ермак Г.П., Абраменко И.С., Колесник О.Л., Скрынник Б.К., Шестопалов В.П. // Исследования взаимодействия электроматнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 15-20.

Предложен метод контроли функционального состояния биообъектов с помощью автодинного генератора дифракционного излучения. Проведено экспериментальное исследование характеристик рассеивания СВЧ сигналов сетчаткой глаза Bana temporaria при воздействии светового стимула. Ил.4. Библиогр.: 7 назв.

УДК 538.569:57

Спиновий межанизм влияния миллиметрового излучения на биологические процесси / Шияновский С.В. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 20-29.

Исследована кинетика заселенности триплетных подуровней промежуточных продуктов биохимических реакций в процессе облучения с учетом спин-решеточной релаксации. Определены вклады вращения можкул и постоянного магнитного поля в интенсивность межуровневых переходов. Показано, что влияние миллиметрового излучения на ортанизмы через спиновую подсистему возможно только в металлоорганических комплексах ионов переходных металлов. Ил.1. Библиогр.: 20 назв.

УЛК 576.315:581.5:575.042

Реакция клеток растений на действие радиоволи миллиметрового пиапазона / Шестопалова Н.Г., Головина Л.Н., Петрушин А.А., Корнеенков В.К. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1989. — С. 29—34.

Приведены данные экспериментальных исследований взаимосвязанных показателей, отражающих изменение физиолого—тенетической активности клеток растений после действия радиоволи мм диапазона. Ил.3. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

УЛК 577:621.347.335.3.029.64

Применение миллиметровой диэлектрометрии в биологии и медищине / Малая Л.Т., Цеголева Т.Ю., Бахова Л.К. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 35-40.

Работа посвящена сопоставлению результатов исследования методом СВЧ диэлектрометрии молекулярного механизма повреждения аденилатиживаной системы эритроцитов при развитии сердечно-сосущиетой патологии с клиническими проявлениями. Ил.4. Биолиогр.: 5 назв.

YDK 541.144

об эффектах воздействия микроволнового электромагнитного излучения на биомолекулирные системы / Сериков А.А., Христофоров Л.Н.// Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 41-50.

Проведен теоретический анализ возможных механизмов взаимодействия микроволнового электромагнитного излучения с оиологическими изкромолекулами. Показано, что эксперименты по оиологическому действию сласых СВЧ полей можно объяснить в предположении добротности дипольно-активных колебаний в оиополимерах, превышающей значения 10°-10°. Высказаны соображения о возможной причине столь высоких добротностей колебаний в активных центрах глобулярных омоможнул. Ил.5. Биолиогр.: 8 назв.

УЛК 621.317

ЭПВ — спектрометр диапазона длин волн 4-1,5 мм / Ворсуль К.В., Смирнова Т.А., Черпак Н.Т. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук, думка, 1989.— С. 51-53.

Описан спектрометр бегущей волни или исследования ЭПР спектров кристаллов в диапазоне длин волн $\lambda = 4-1.5$ мм, в интервале температур 1,7-10 К в магнитных полях до 30 кд. Ил.2. Биолмогр.: 9 назв.

УДК 57.043

Диэлектрический разогрев криоконсервированных клеточных суспензий в сантиметровом и миллиметровом диапазонах /Бобрышев В.Д., Снурников А.С., Швед В.Б. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр.— Киев: Наук.думка,1989. С. 53-58.

Рассмотрена математическая модель, описывающая процесс дизлектрического разогрева двухфазной системи, состоящей из жидили
сферических вилючений и леднной матрицы, которая по электрофизическим и теплофизическим характеристикам приоближается к регльной
криобиологической системе. Показано, что в сантиметровой области
СВЧ диапазона диэлектрический разогрев криоконсервированных клеточных суспензий приводит к значительным локальным перегревам в
фазовых неоднородностях. Максимум локального перегрева соответствует частотам порядка 50 ГТц, при дальнейшем повышении частоты
значение локального перегрева падает. Область применения — криобиология. Ил.5. Биолиогр.: 4 назв.

УДК 530.1:534.2:577.3

О взаимодействии вибронно возбужденных биополимеров с внешними электромагнитными полями / Гайдидей Ю.Б. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 58-66.

Излагаются результаты исследований воздействия электромагнитных полей на биополимери, находящиеся в возбужденных состояниях. Проанализированы конфигурации пептидных групи в «спиральных биополимерах. Показана возможность управления ими внешнам электрическим полем. Изучены самосогласованные состояния внутримолекулярных возбуждений с ориентационными колебаниями пептидных групи. Показано существование трех типов самосогласованных состояний, одно из которых автолокализованное эксимерное, а два других — экситонные (солитонные при учете взаимодействия с деформационными степенями свободы). Проанализированы особенности взаимодействия электромагнитных воли с данными возбужденными состояниями. Биолиогр.:

YAR 536: 557: 574: 577

Влияние внешнего электромагнитного поля на процесси упорядочения в средах с биохимическими реакциями / Чални А.В. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 66-74.

Рассмотрено влияние электромагнитного поля на процесс образования упорядоченных структур в системе с биохимическими реакциями. Определено изменение критических параметров вещества в зависимости от характеристик электромагнитного поля и электродинамических свойств вещества. Доказана возможность перехода физикокимической системы под действием электромагнитного излучения СВЧ или КВЧ диапазонов в упорядоченное состояние. Получены критерии и численные оценки, карактеризующие этот переход. Библиогр.:

УЛК 57.043

Контрастирование зон колодовой некротизации в сочетании с микроволновим воздействием /Швед Б.В., Бобришев В.Д. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 74-77.

Предлагается использовать СВЧ излучение, предпочтительно миллиметрового диапазона, для снижения эффекта колодового повреждения здоровых тканей при криодеструкции патологических новосоразований. В основу положено существенное различие в коэффициентах поглощения СВЧ для замороженных и незамороженных зон. Используя принатую математическую модель, описывающую процесс замораживания при криодеструкции, на конкретных примерах показано существенное снижение эффекта холодового повреждения здоровых тканей в случае, когда сквозь замороженную зону подается СВЧ излучение миллиметрового диапазона. Область применения — криохирургия. Ил. 2. Библиогр.: 3 назв.

УДК 577.3

Возможный механизм работи синапса как неравновесной системы, восприничивой к влиянию внешних физических полей /Радченко Д.Г., Слабкая И.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук.думка, 1989. — С. 77-85.

На основе анализа экспериментальных фактов предложена математическая модель, устраняющая известные противоречия при трактовке межанизмов синаптической передачи. В основу ее положена гипотеза о взаимосвязанности кратковременного изменения проводимости ионных каналов при генерации потенциала действия и так называемого фазового расслоения в примеморанной области. Последнее ивление обусловливает кооперативный карактер протекающих процессов и в ряде случаев приводит к резкому повышению восприимчивости системы к воздействию внешних факторов. Биолиогра: 11 назв.

Абсорощионний метод исследования спектральных неоднородностей в биологических средах / Ордынец А.Г. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. – Киев: Наук. думка, 1989 г. – С. 85-91.

Предложен новый физический метод исследования спектральных неоднородностей в биологических средах. В его основу положена регистрация оптико-акустических процессов, сопровождающих взаимо-действия частотно-модулированного излучения со спектрально-неоднородной средой. Теоретически и экспериментально на модельном объекте показаны основные особенности и преимущества метода по отношению к существующим. Область применения — исследование резонанскых эффектов взаимодействия микроволнового излучения с биологическими средами. Ил.4. Биолиогр.: В назв.

УДК 615.47:537.811:616.3

Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапазона на оптические свойства кожных покровов / Соломонов В.И., Писанко О.И., Мосежный А.Е., Кириченко Г.И., Туранский В.П. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 91-95.

Приводятся сведения о влиянии низкоинтенсивного излучения КВЧ диапазона на оптические свойства кожных покровов в зоне био-логически активных точек человека. Вследствие влияния низкоинтенсивного ЭМИ показано, что оно приводит к изменению оптических свойств БАТ, которое связано с увеличением объемного кровотока в этих зонах кожных покровов. Ил. 3. Биолиогр.: 6 назв.

УДК 615.47:537.811:616.3

Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапазона на теплопродукцию эпигастральной области /Соломонов В.И., Писанко О.И., Мосежный А.Е., Кириченко Г.И., Туранский В.П. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 96-97.

Приводятся сведения о влиянии низкоинтенсивного излучения КВЧ диапазона на теплопродукцию эпигастральной области у ряда больных гастроэнтерологического профиля. Показано, что воздействие ЭМИ на биологически активные зоны человека приводит к изменению теплопродукции эпигастральной зоны человека, где проецируются основные органы пишеварения: печень, желудок, поджелудочная железа. Биолиогр.: 4 назв.

УЛК 615.47.537.811:616.3

Низкоинтенсивное электромагнитное излучение КВЧ диапазона в комплексном курортном лечении язвенной болезни /Зелинский В.А., Писанко О.И. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. — Киев: Наук.думка, 1989. — С. 97-104.

Содержатся данные о влиянии электромагнитного излучения КВЧ дианазона на интактиях животных и при экспериментальной язве желудка, а также исследован его тераневтический эффект. Установлено, что данный физический фактор и сочетание его с пелоидотерапией показан в комплексном санаторно-курортном лечении больных язвенной болезнью, так как воздействует на ряд местных механизмов, участвующих в развитии язвообразования — нарушении ощелачивания в двенадпатиперстной клиже и изменении процессов репарации в гастродуоденальной зоне. Табл. 4. Библиогр.: 15 назв.

УЛК 621.347+645.475

Инструментальные методы исследования биологических систем в миллиметровом диапазоне радиоволн / Искин В.Д. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. – Киев: Наук.думка, 1989. – С. 104-110.

Указываются наиболее перспективные области применения КВЧ излучения в сельском хозяйстве. Формулируются основные технические задачи, витекающие из анализа существующего состояния проблемы и определяющие в своей совокупности актуальное научное направление. Предлагаются новые методы к проведению экспериментальных исследований, основанные на кратком библиографическом обзоре опубликованных автором работ. Ил.4. Библиогр.: 26 назв.

УЛК 621.317+615.475

Исследование структуры излучения диэлектрического стержня в воде / Искин В.Д., Буткус Г.Т., Бутенко А.В., Медведовский А.В. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.на-уч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С.111-123.

Рассматривается излучатель для исследования биологических систем. Излучатель представляет собой радиопрозрачный стержень прямоугольного сечения, погруженный в воду. Приведены зависимости амплитуды КВЧ поля от всех трех координат вблизи поверхности стержия, измеренные с помощью специального зонда. Показано, что покрытие поверхности излучателя тонким проводящим слоем позволяет регулировать продольный коэффициент затухания КВЧ поля и реализовать ряд новых экспериментальных методик, основанных на поиске корреляции между амплитудой электромагнитного поля и свойствами биологических систем. Ил.5. Биолиогр.: 43 назв.

УДК 621.391

Влияние неровностей земных покровов на рассеяние и излучение радиоволн / Андреев Г.А., Гладышев Г.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 123-131.

При обработке и интерпретации получаемой с систем дистанционного зондирования информации существенным оказывается влияние
неровностей земных покровов на их тепловое излучение и рассеяние
излучения толии атмооферы. В работе приведены количественные
оценки этого влияния на основе использования плоского альбедо и
интегрального коэффициента рассеяния теплового излучения толии
атмосферы. Получены соотношения, описывающие контрасты радмотенлового поля различных типов покровов. Результаты, представленные
в работе, позволяют проводить оперативную обработку и интерпретацию данных агромониторинга в системах автоматизированного управления сельскохозяйственными комплексами. Ил.3. Библиогр.: 11 назв.

УДК 551.46.0:629.78

Определение температуры почв по дистанционным поляризационным измерениям теплового радиоизлучения / Андреев Г.А., Агратин С.Г., Гладышев Г.А., Станкевич О.К. // Исследования взаимодействия электромагнитных воли миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 132-138.

Описан метод определения температуры почв по дистанционным поляризационным измерениям теплового радиоизлучения. В радиодиананове из выражения для коэффициентов Френеля ноторое для глагих покровов при угле наблюдения 45° переходит в инвариант: $n_x = n_u = 7$. Однако на практике необходимо учитывать неровности поверхности и подсвечивающее излучение толщи атмосферы. Полученные выражения для их учета дают возможность определения относительной погрешности измерений температуры. Ошибка в определении температуры при среднеквадратичном тангенсе угла наклона 0,2 составляет 8%, максимальная погрешность при учете излучения толщи атмосферы—16 к. Для отрасотки методики измерений был проведен эксперимент. Излучение покрова принималось радиометром на волне 8 мм. В результате измерений получена температура, отличная от реальной на 2,5 к, что удовлетворительно согласуется с теоретическими расчетами. Ил.4. Биолиогр.: 8 назв.

УДК 551.596.08

Биофизический комплекс для определения объемной скорости потока и давления / Зверев В.В., Ермак Г.П., Россихин В.В., Алексеевский С.Д. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч.тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 138-142.

Описан биобизический комплекс для определения объемной скорости потока биологических жидкостей и давления в полых органах млекопитающих и человека. Ил. 4. К статье Н. Г. Шестопаловой, Л. Н. Головиной, А. А. Петрушина, В. К. Корнеенкова «Реакция клеток растений на действие радиоволн миллиметрового диапазона»



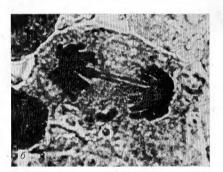


Рис. 2. Хромосомные аберрации в клетках лука

К статье В. Д. Искина «Инструментальные методы исследования биологических систем в миллиметровом диапазоне радиоволн»

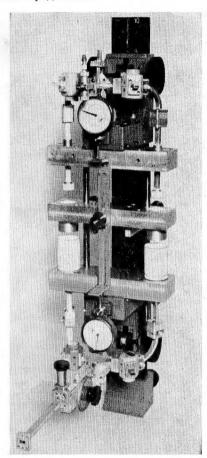


Рис. 1. Установка для измерения комплексной диэлектрической проницаемости разбавленных водных растворов

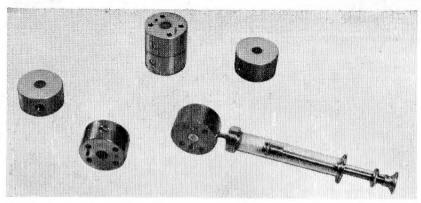


Рис. 2. Скин-кюветы для исследования жидких и порошковых материалов

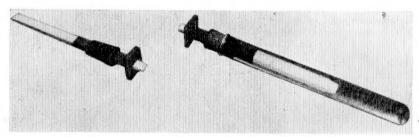


Рис. 3. Кюветы для микроволновой обработки культуры клеток

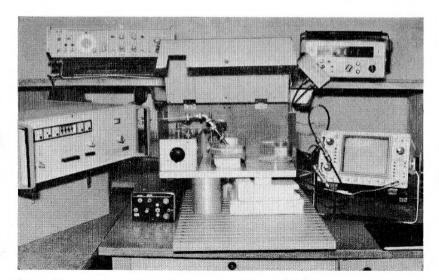


Рис. 4. Установка для исследования воздействия КВЧ излучения на биологические липидные мембраны

